



**TUGAS AKHIR - RE 141581**

# **PERENCANAAN EMISI PM<sub>10</sub> PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON - BANTEN**

**WAODE NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN**  
0321124000066

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**TUGAS AKHIR - RE 141581**

# **PERENCANAAN EMISI PM<sub>10</sub> PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON - BANTEN**

**WAODE NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN**  
**03211240000066**

**DOSEN PEMBIMBING**  
**Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN**  
**Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2018**



**FINAL PROJECT - RE 141581**

## **DESIGN OF PM<sub>10</sub> EMISSIONS IN THE STEEL MAKING INDUSTRY CILEGON - BANTEN**

**WAODE NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN**  
**03211240000066**

**SUPERVISOR**  
**Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT**

**DEPARTEMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**  
**Faculty of Civil, Environmental and Geo Engineering**  
**Institute of Technology Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2018**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGELOLAAN EMISI PM<sub>10</sub> PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON – BANTEN

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Waode Nurul Roisyah Aminy Budiman**  
NRP. 03211240000066

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT  
NIP. 196601161997032001



## Pereencanaan Emisi PM<sub>10</sub> pada Industri Peleburan Baja Cilegon - Banten

Nama Mahasiswa : W. Nurul Roisyah Aminy Budiman  
NRP : 03211240000066  
Departemen : Teknik Lingkungan  
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

### ABSTRAK

Sistem produksi eksisting di PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., menggunakan alat pengendalian pencemaran udara berupa *dust collector*. *Dust collector* dinilai kurang efisien dalam mengendalikan partikulat terbukti dari debu *fugitive* yang masih bertebaran. *Blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., direncanakan menggunakan alat pengendalian pencemaran udara berupa *wet scrubber*. *Wet scrubber* sendiri adalah alat pengendalian pencemaran udara yang bekerja dengan prinsip mengkontakkan udara yang megandung partikulat halus dengan tetesan cairan (de Nevers, 2000). Diharapkan dengan alat pengendalian pencemaran udara yang baru ini emisi yang dikeluarkan sesuai baku mutu.

*Wet Scrubber* adalah salah satu alat yang disarankan untuk mengolah emisi industri metalurgi. *Wet Scrubber* menggunakan gaya inersia partikulat dan *droplet* untuk mentransfer partikulat dari aliran gas ke *liquid*. Keunggulan dari *Wet Scrubber* dibandingkan alat pengendali pencemaran udara lain adalah biaya investasi, operasi dan pemeliharaan yang lebih murah. Mekanisme pengumpulan dari *Wet Scrubber* adalah *inertial impaction* dan *interception*.

*Wet Scrubber* yang digunakan untuk perencanaan ini adalah *venturi scrubber* yang mempunyai nilai efisiensi untuk mengeliminasi partikulat sampai dengan 99%. Material lolos untuk ukuran partikel di bawah 5  $\mu\text{m}$  adalah sebesar 0,122. Dengan *pressure drop* sebesar 10,406 inci kolom air, partikulat yang disingkirkan sebesar 87,8%.

**Kata kunci:** *Blast furnace*, Cilegon, partikulat, *Venturi scrubber*, *wet scrubber*.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **Design of PM<sub>10</sub> Emission in the Steel Making Industry Cilegon – Banten**

Name : W. Nurul Roisyah Aminy Budiman  
NRP : 03211240000066  
Departement : Environmental Engineering  
Supervisor : Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

### **ABSTRACT**

The existing production system in PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., using a dust collector to control their emission. Dust collectors are considered inefficient in controlling particulates, as evidenced by the fugitive dust that is still scattered. Blast furnace PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., planned to use wet scrubber as their air pollution controller. Wet scrubber is an air pollution controller that works with the principle of contacting air with liquid droplets (de Nevers, 2000). It is expected that with this new air pollution controller, emissions released by the blast furnace is suitable with the quality standard.

Wet Scrubber is one of the recommended devices for processing metallurgical industry emissions. Wet scrubber uses particulate inertial force and droplet to transfer particulates from the gas stream to the liquid. The advantages of wet scrubber compared to other air pollution controller are low in investment, operation and maintenance costs. The collecting mechanism of wet scrubber is inertial impaction and interception.

Wet Scrubber used for this planning is a venturi scrubber that has efficiency value to eliminate particulates up to 99%. Material loss for particle size below 5  $\mu\text{m}$  is 0,122. With a pressure drop of 10.406 inches of water column, the removed particles were 87.8%.

**Keywords: Blast furnace, Cilegon, particulate, Venturi scrubber, wet scrubber.**

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya. Sehingga laporan tugas akhir dengan judul **“Pengelolaan Emisi PM<sub>10</sub> pada Industri Peleburan Baja Cilegon – Banten”** ini dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, M.T., selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan arahan, ilmu, serta bimbingan.
2. Bapak Dr. Eng Arie Dipareza Syafei, S.T., MEPM., Bapak Welly Herumurti, S.T., M.Sc., Bapak Alfian Purnomo, S.T., M.T., dan Ibu Harmin Sulistyaning Titah, S.T., M.T., PhD., selaku dosen penguji yang telah banyak memberi masukan dan saran dalam penyusunan laporan.
3. Ayah, ibu, uti, adik dan Raden Vidi Trysatria yang tidak pernah berhenti memberikan dukungan, semangat dan doa.
4. Teman-teman Teknik Lingkungan 2012 yang tetap memberikan dorongan semangat, teman-teman yang sudah membantu selama keberlangsungan penelitian khususnya Ratna Rizki R.
5. Segenap civitas akademika Teknik Lingkungan ITS.
6. Seluruh pihak secara langsung maupun tidak langsung yang memberikan bantuan kepada penulis.

Penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Serta bisa menambah referensi mengenai pengelolaan emisi PM<sub>10</sub> di Cilegon – Banten.

Surabaya, Juli 2018  
Penulis

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	1
1.3 Ruang Lingkup .....	2
1.4 Tujuan .....	2
1.5 Manfaat .....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Emisi .....	5
2.2 Pengendalian Pencemaran Udara .....	7
2.3 Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara .....	9
2.3.1 Teknologi Pengendali Partikulat Pencemar Udara .....	9
2.3.1.2 <i>Gravity Settling Chamber</i> .....	9
2.3.1.3 <i>Fabric Filter/ Baghouse</i> .....	10
2.3.1.4 Siklon .....	10
2.3.1.5 <i>Electrostatic Precipitator (EP)</i> .....	10
2.3.2 Teknologi Pengendali Gas Pencemar Udara .....	10
2.3.2.1 <i>Adsorber</i> .....	10
2.3.2.2 <i>Absorber/Scrubber</i> .....	11
2.3.2.3 Kondensor .....	11

2.3.2.4	<i>Combustion</i> .....	11
2.4	Identifikasi Emisi Gas Buang pada Peleburan Baja di <i>Billet Steel Plant (BSP)</i> .....	11
2.5	Karakteristik Emisi.....	14
2.6	<i>Blast Furnace</i> .....	14
2.7	<i>Wet Scrubber</i> .....	14
2.8	Mekanisme <i>Scrubber</i> .....	16
2.9	Jenis-jenis <i>Scrubber</i> .....	17
2.8.1	<i>Spray Tower</i> .....	17
2.8.2	<i>Cyclonic Spray Tower</i> .....	18
2.8.3	<i>Dynamic Scrubber</i> .....	19
2.8.4	<i>Tray Tower</i> .....	19
2.8.5	<i>Venturi Scrubber</i> .....	20
2.8.6	<i>Orifice Scrubber</i> .....	20
2.8.7	Desain Lainnya .....	21
2.10	<i>Venturi Scrubber</i> .....	22
2.9.2	Sistem Injeksi Cairan .....	25
2.9.3	<i>Venturi Throat Section</i> .....	26
2.9.4	Ruang Pengumpul dengan <i>Mist Eliminator</i> .....	28
2.9.5	Sistem Pengumpul Limbah Cair dan Pembuangan ...	28
2.9.6	Peralatan Bantu .....	29
2.10	Kriteria Desain <i>Wet Scrubber</i> .....	30
2.10.1	Ukuran Partikel dan Debit .....	30
2.10.2	<i>Flow Rate</i> dari Gas Buang, Temperatur dan Kelembaban .....	32
2.10.3	Kecepatan Gas dan <i>Pressure Drop</i> .....	32

2.10.4 Rasio Liquid-to-Gas .....	33
2.10.5 Ukuran Droplet .....	33
2.10.6 Waktu Tinggal.....	34
2.11 Desain Sistem .....	34
2.11.1 Beban dan Distribusi Partikel .....	34
2.12 Desain <i>Scrubber</i> .....	41
2.12.1 Memperkirakan <i>Pressure Drop</i> .....	42
2.12.2 Teori Daya Kontak.....	43
2.12.3 Kurva Kinerja .....	46
2.12.4 Metode <i>Culvert Cut Diameter</i> .....	47
2.12.5 Kecepatan <i>Scrubber</i> dan Area Penampang .....	49
2.13 Sumber Daya Lainnya.....	51
2.13.1 Penggunaan Air .....	51
2.13.2 Penggunaan Daya Listrik .....	52
2.14 Kelebihan dan Kekurangan <i>Wet Scrubber</i> .....	53
2.14.1 Kelebihan Wet Scrubber.....	53
2.14.2 Kekurangan Wet Scrubber .....	54
BAB 3 GAMBARAN UMUM WILAYAH PERENCANAAN.....	55
3.1 Sejarah Perusahaan .....	55
3.2 Lokasi Perusahaan.....	56
3.3 Proses Produksi Baja Secara Umum.....	57
3.4 Pengelolaan Kualitas Udara PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk. ....	60
3.5 Gambaran Lokasi Perencanaan <i>Wet Scrubber</i> .....	61
BAB 4 METODELOGI PERENCANAAN.....	63
4.1 Umum.....	63

4.2	Kerangka Perencanaan .....	63
4.2.1	Studi Literatur .....	63
4.2.2	Pengumpulan Data .....	63
4.2.3	Pengolahan Data dan Perencanaan <i>Wet Scrubber</i> ...	64
4.2.4	Pemilihan Jenis <i>Wet Scrubber</i> .....	64
4.2.5	Perhitungan Desain <i>Wet Scrubber</i> .....	64
4.2.6	Perhitungan Efisiensi <i>Wet Scrubber</i> .....	64
4.3	Pembuatan Laporan .....	65
4.4	Kesimpulan dan Saran .....	65
BAB 5	ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....	67
5.1	Analisis Kapasitas Produksi .....	67
5.2	Analisis <i>Mass Balance</i> PM .....	67
5.3	Analisis Sebaran Partikel, Densitas dan Ukuran .....	69
5.4	Pemilihan Jenis Pengendalian .....	69
5.5	<i>Preliminary Sizing Wet Scrubber</i> .....	69
5.5.1	Beban dan Distribusi Partikel .....	69
5.5.2	Sifat Gas Buang .....	70
5.5.3	<i>Psychrometric Chart</i> .....	72
5.6	Alternatif <i>Wet Scrubber</i> .....	73
5.7	Desain <i>Scrubber</i> .....	76
5.7.1	Menghitung <i>Pressure Drop</i> .....	76
5.7.2	Menghitung Daya Kontak .....	79
5.7.3	Kecepatan <i>Scrubber</i> dan Area Penampang .....	82
5.8	Menghitung Penggunaan Sumber Daya Lainnya .....	85
5.8.1	Menghitung Penggunaan Air .....	85
5.8.2	Menghitung Penggunaan Daya Listrik .....	87

5.9 Menghitung Cost .....	88
5.9.1 <i>Capital Cost</i> .....	88
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....	91
6.1 Kesimpulan .....	91
6.2 Saran .....	91
DAFTAR PUSTAKA .....	93
BIOGRAFI PENULIS .....	97

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem <i>Scrubber</i> .....	6
Gambar 2.2	<i>Venturi Scrubber</i> .....	11
Gambar 2.3	Skematik Sistem <i>Venturi Scrubber</i> .....	12
Gambar 2.4	Jenis – Jenis <i>Nozzle</i> .....	15
Gambar 2.5	Perkiraan Efisiensi Pengumpulan Partikel Kisaran Diameter 0,1-10 $\mu\text{m}$ pada <i>Venturi</i> dengan <i>Pressure Drop</i> 6,8-50 inci $\text{H}_2\text{O}$ .....	18
Gambar 2.6	Rasio <i>Liquid-Gas</i> sebagai Fungsi Beban Partikel.	19
Gambar 2.7	Distribusi Ukuran Partikel untuk Sumber PM.....	22
Gambar 2.8	Grafik <i>Psychrometric</i> .....	27
Gambar 2.9	Hubungan antara <i>Pressure Drop</i> , Kecepatan di <i>Throat</i> dan L/G.....	28
Gambar 2.10	Penetrasi dan <i>Pressure Drop</i> Ditentukan dengan Kurva Kinerja.....	32
Gambar 2.11	<i>Cut Diameter</i> sebagai Fungsi <i>Cut Ratio</i> dan Standar Deviasi Distribusi Ukuran Partikel.....	34
Gambar 2.12	<i>Cut Diameter</i> sebagai Fungsi <i>Cut Ratio</i> dan Standar Deviasi Distribusi Ukuran Partikel, $B = 2,0$ .....	34
Gambar 2.13	Daya <i>Scrubber</i> dan <i>Pressure Drop</i> sebagai Fungsi dari <i>Cut Diameter</i> , <i>Venturi</i> Ditunjukkan oleh Garis No. 4.....	35
Gambar 3.1	Peta PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.....	42
Gambar 3.2	Alur Proses Produksi PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.....	42
Gambar 3.3	Diagram Proses Produksi secara Umum dan Peraturan Terkait Lingkungan.....	47
Gambar 4.1	Diagram Alir Metodologi Perencanaan.....	49

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Baku Mutu Emisi untuk Industri Besi dan Baja.....6
Tabel 2.2	Hasil Uji Emisi pada <i>Billet Steel Plant</i> (BSP), <i>Billet</i> Barat, Februari 2014.....8
Tabel 2.3	<i>Chemical Test</i> pada Limbah Debu EAF.....9
Tabel 2.4	Parameter Operasi untuk <i>Wet Scrubber</i> .....43
Tabel 2.5	Parameter Korelasi Daya Kontak.....44
Tabel 2.6	Kebutuhan Energi Pompa dan Fan (1000 cfm, $\eta = 90\%$ pada $\mu\text{m}$ ).....53
Tabel 5.1	Distribusi Ukuran Partikulat.....67
Tabel 5.2	Kandungan Elemen dan Ukuran Diameter Partikulat pada Gas Buang.....68
Tabel 5.3	<i>Stage Removal</i> Setiap Elemen pada Gas Buang.....68
Tabel 5.4	Perbandingan Efisiensi Removal Tiap Alternatif...74
Tabel 5.5	Pembobotan Alternatif <i>Wet Scrubber</i> .....75
Tabel 5.6	Perhitungan <i>Removal</i> Partikulat Awal.....75
Tabel 5.7	Perhitungan <i>Removal</i> Partikulat Akhir.....76
Tabel 5.8	Parameter Operasi <i>Scrubber</i> .....77
Tabel 5.9	Kebutuhan Energi pada Berbagai Macam Jenis <i>Scrubber</i> .....86

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kota Cilegon di Provinsi Banten adalah kota industri khususnya baja terbesar di Indonesia. PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., merupakan perusahaan pembuat baja no. 1 di Asia Tenggara. Kapasitas produksi dari PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., sebesar 3,15 juta ton/tahun (BUMN, 2013). Padahal, sampai tahun 2015 konsumsi baja di dalam negeri sendiri diperkirakan mencapai 15 juta ton (Kementerian Perindustrian RI, 2015). Karena kurangnya tingkat produksi dari PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., maka dikembangkan teknologi yang dapat menjawab permintaan dari pasar dengan membangun pabrik baru yaitu *Blast Furnace*.

*Blast Furnace* merupakan *project* terbaru dari PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., dan MCC-CERI yang saat ini masih dalam tahap konstruksi (Kementerian Perindustrian RI, 2015). Proses yang terjadi di dalam *blast furnace* menghasilkan produk sampingan berupa partikulat. Berdasarkan PP Nomor 41 Tahun 1999 Pasal 25 Ayat 1, setiap orang atau penanggungjawab usaha dan/atau kegiatan yang menyebabkan terjadinya pencemaran udara dan/atau gangguan wajib melakukan upaya penanggulangan dan pemulihannya.

Sistem produksi eksisting di PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., menggunakan alat pengendalian pencemaran udara berupa *dust collector*. *Dust collector* dinilai kurang efisien dalam mengendalikan partikulat, terbukti dari debu fugitive yang masih bertebaran. *Blast Furnace* PT Kakatau Steel (Persero) Tbk., direncanakan menggunakan alat pengendalian pencemaran udara berupa *wet scrubber*. *Wet Scrubber* sendiri adalah alat pengendalian pencemaran udara yang bekerja dengan prinsip mengkontakkan udara yang mengandung partikulat halus dengan tetesan cairan (de Nevers, 2000). Diharapkan dengan alat pengendalian pencemaran udara yang baru ini debu fugitive dapat berkurang dan emisi yang dikeluarkan sesuai dengan baku mutu.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, maka rumusan masalah dalam perencanaan ini adalah:

1. Perlunya menyediakan teknologi alternatif dalam pengolahan emisi dari *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.
2. Perlunya mendesain *wet scrubber* untuk *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.
3. Perlunya menghitung efisiensi dari *venturi scrubber* yang akan digunakan pada *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.

### 1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam tugas akhir perencanaan *wet scrubber blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten ini adalah:

1. Parameter kualitas udara yang digunakan adalah partikulat.
2. Baku mutu yang digunakan dalam perencanaan ini adalah Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak.
3. Wilayah perencanaan akan dilakukan di PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten, *blast furnace project*.
4. Jenis *wet scrubber* yang digunakan adalah *venturi scrubber*.

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir perencanaan ini adalah:

1. Menyediakan teknologi alternatif untuk pengolahan emisi dari *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.
2. Mendesain *wet scrubber* untuk *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.
3. Menentukan efisiensi dari *venturi scrubber* yang akan digunakan pada *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.

### 1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan pada tugas akhir perencanaan ini adalah:

1. Dapat mengurangi beban emisi yang dikeluarkan oleh *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten

sehingga bisa mengurangi dampak pencemaran di lingkungan sekitar.

2. Menyediakan pilihan teknologi pengolahan emisi yang sesuai dengan kondisi *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.
3. Sebagai rekomendasi desain *wet scrubber* bagi PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten.
4. Sebagai inovasi dan referensi dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Emisi**

Emisi adalah makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain yang dihasilkan dari kegiatan yang masuk atau dimasukkan ke dalam udara ambient. Sumber emisi adalah setiap badan usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan emisi. Sumber emisi diklasifikasikan menjadi sumber bergerak, sumber bergerak spesifik, sumber tidak bergerak, dan sumber tidak bergerak spesifik. Sumber emisi tidak bergerak adalah sumber yang tetap pada suatu tempat. Contoh dari sumber tidak bergerak adalah kegiatan industri (Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999).

Parameter kualitas udara menurut Assomadi (2009) adalah sebagai berikut:

1. Partikulat ( $PM_{10}$ )  
Partikulat debu melayang merupakan campuran yang sangat rumit dari berbagai senyawa organik dan anorganik yang terbesar di udara dengan diameter yang sangat kecil, mulai dari  $< 1$  mikron sampai dengan maksimal 500 mikron. Partikulat debu tersebut akan berada di udara dalam waktu yang relative lama dalam keadaan melayang-layang dan masuk ke dalam tubuh manusia melalui saluran pernafasan.
2. Karbon monoksida (CO)  
Karbon dan oksigen dapat bergabung membentuk senyawa karbon monoksida (CO) sebagai hasil pembakaran yang tidak sempurna. Karbon monoksida merupakan senyawa yang tidak berbau, tidak berasa dan pada suhu udara normal berbentuk gas yang tidak berwarna. Karbon monoksida mempunyai potensi bersifat racun yang berbahaya karena mampu membentuk ikatan yang kuat dengan pigmen dara yaitu haemoglobin.
3. Sulfur dioksida ( $SO_2$ )  
Sulfur dioksida mempunyai karakteristik bau yang tajam dan tidak mudah terbakar di udara. Di udara  $SO_2$  selalu terbentuk dalam jumlah besar.
4. Nitrogen dioksida ( $NO_2$ )  
Oksida nitrogen ( $NO_x$ ) adalah kelompok gas nitrogen yang terdapat di atmosfer, terdiri dari nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida ( $NO_2$ ). Nitrogen monoksida merupakan gas

yang tidak berwarna dan tidak berbau sebaliknya nitrogen dioksida berwarna coklat kemerahan dan berbau tajam.

5. Ozon (O<sub>3</sub>)

Ozon merupakan salah satu zat pengoksidasi yang sangat kuat setelah fluor, oksigen dan oksigen fluoride (OF<sub>2</sub>). Ozon terbentuk di udara pada ketinggian 30 km dimana radiasi UV matahari secara perlahan memecah molekul oksigen (O<sub>2</sub>) menjadi atom oksigen, atom – atom oksigen secara cepat membentuk ozon.

Tabel 2.1 memaparkan tentang baku mutu emisi untuk industri besi dan baja menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia nomor 13 tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber tidak Bergerak.

**Tabel 2.1** Baku Mutu Emisi untuk Industri Besi dan Baja

Sumber		Parameter	Batas Maksimum (mg/m <sup>3</sup> )
1.	Penanganan Bahan Baku (Raw Material Handling)	Total Partikel	150
2.	Tanur Oksigen Biasa ( <i>Basic Oxygen Furnace</i> )	Total Partikel	150
3.	Tanur Busur Listrik ( <i>Electric Arc Furnace</i> )	Total Partikel	150
4.	Dapur Pemanas ( <i>Reheating Furnace</i> )	Total Partikel	150
5.	Dapur Proses Pelunakan Baja ( <i>Annealing Furnace</i> )	Total Partikel	150
6.	Proses Celup Lapis Metal ( <i>Acid Pickling &amp; Regeberation</i> )	Total Partikel	150
		<i>Hydrochloric Acid Fumes (HCl)</i>	15

Sumber		Parameter	Batas Maksimum (mg/m <sup>3</sup> )
7.	Tenaga Ketel Uap ( <i>Power Boiler</i> )	Total Partikel	230
		Sulfur Dioksida (SO <sub>2</sub> )	800
		Nitrogen Oksida (NO <sub>2</sub> )	1000
8.	Semua Sumber	Opasitas	20%

Catatan:

- Nitrogen Oksida ditentukan sebagai NO<sub>2</sub>.
- Volume gas dalam keadaan standar (25° C dan tekanan 1 atm).
- Untuk sumber pembakaran, partikulat dikoreksi sebesar 10% oksigen.
- Opasitas digunakan sebagai indikator praktis pemantauan dan dikembangkan untuk memperoleh hubungan korelatif dengan pengamatan total partikel.
- Pemberlakuan BME untuk 95% waktu normal selama 3 bulan.

## 2.2 Pengendalian Pencemaran Udara

Pengendalian pencemaran udara adalah upaya pencegahan dan/atau penanggulangan pencemaran udara serta pemulihan mutu. Tujuannya adalah menghilangkan atau mengurangi kontaminasi yang ada di dalam emisi sehingga tidak mengganggu apabila dibuang ke lingkungan. Pada prinsipnya, pengendalian pencemaran udara mengikuti proses penyisihan partikel dan gas pencemar di atmosfer. Pendekatan dalam pengendalian pencemaran udara adalah pengenceran dan pengendalian pencemar pada sumber. Sistem pengendalian pencemaran udara dibagi menjadi dua yaitu, pengendalian partikula dan pengendalian fasa gas. Menurut Kania (2009), pemilihan jenis alat pengendalian pencemaran udara harus didasarkan pada:

1. Ukuran partikel.
2. Efisiensi penyisihan yang ingin dicapai.
3. Waktu pembersihan.

#### 4. Karakteristik partikel.

Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Nomor 205 Tahun 1996 tentang Pedoman Teknis Pengendalian Pencemaran Udara Sumber Tidak Bergerak, adalah sebagai berikut:

1. Inventarisasi kualitas udara daerah dengan mempertimbangkan berbagai kriteria yang ada dalam pengendalian pencemaran udara.
2. Penetapan baku mutu udara ambien dan baku mutu emisi yang digunakan sebagai tolok ukur pengendalian pencemaran udara.
3. Penetapan mutu kualitas udara di suatu daerah termasuk perencanaan pengalokasian industri dan/atau kegiatan yang berdampak mencemari udara.
4. Pemantauan kualitas udara baik ambien dan emisi yang diikuti dengan evaluasi dan analisis.
5. Pengawasan terhadap penataan peraturan perundang-undangan pengendalian pencemaran udara.
6. Peran masyarakat dalam kepedulian terhadap pengendalian pencemaran udara.
7. Kebijakan bahan bakar bersih dan ramah lingkungan.
8. Penetapan kebijakan dasar baik teknis maupun non teknis dalam pengendalian pencemaran udara secara nasional.

Secara umum menurut peraturan Badan Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Barat tahun 2014, kewajiban usaha dan/atau kegiatan dalam pengendalian pencemaran udara dalam peraturan terkait emisi sumber tidak bergerak adalah sebagai berikut:

- a. Membuang emisi gas melalui cerobong yang dilengkapi dengan sarana pendukung dan alat pengaman sesuai peraturan yang berlaku;
- b. Memasang alat ukur pemantauan yang meliputi kadar dan laju alir volume untuk setiap cerobong emisi yang tersedia serta alat ukur arah dan kecepatan angin;
- c. Melakukan pencatatan harian hasil emisi yang dikeluarkan dari setiap cerobong emisi (CEMs).
- d. Melakukan pengujian emisi yang dikeluarkan dari setiap cerobong paling sedikit 2 (dua) kali selama periode operasi

- setiap tahunnya bagi sumber emisi tidak bergerak yang beroperasi selama 6 (enam) bulan atau lebih;
- e. Melakukan pengujian emisi yang dikeluarkan dari setiap cerobong paling sedikit 1 (satu) kali selama periode operasi setiap tahunnya bagi sumber emisi tidak bergerak yang beroperasi kurang dari 6 (enam) bulan;
  - f. Menggunakan laboratorium yang terakreditasi dalam pengujian emisi sebagaimana dimaksud dalam huruf d dan huruf e;
  - g. Melakukan pengujian emisi setelah kondisi proses pembakaran stabil;
  - h. Menyampaikan laporan hasil analisis pengujian emisi sebagaimana dimaksud dalam huruf c kepada Bupati/Walikota, dengan tembusan Gubernur dan Menteri paling sedikit 1 (satu) kali dalam 3 (tiga) bulan, untuk huruf d atau e paling sedikit 1 (satu) kali dalam 6 (enam) bulan;
  - i. Melaporkan kejadian tidak normal dan/atau keadaan darurat yang mengakibatkan baku mutu emisi dilampaui serta rincian upaya penanggulangannya kepada Bupati/Walikota, dengan tembusan Gubernur dan Menteri.

## **2.3 Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara**

Untuk mengurangi pencemaran udara hingga mencapai tingkat tidak mencemari lingkungan dan memenuhi baku mutu adalah dengan menggunakan teknologi pengendalian pencemaran udara. Teknologi pengendalian pencemaran udara dibagi menjadi dua yaitu, teknologi pengendali partikulat pencemar udara dan teknologi pengendali gas pencemar udara (BLH Provinsi Jawa Barat, 2014).

### **2.3.1 Teknologi Pengendali Partikulat Pencemar Udara**

#### **2.3.1.1 *Wet Scrubber***

Memiliki prinsip kerja yaitu arus gas kotor dikontakkan dengan cairan, dengan cara penyemprotan atau dialirkan air.

#### **2.3.1.2 *Gravity Settling Chamber***

Prinsip penyisihan partikulat dalam teknologi ini adalah gas yang mengandung partikulat dialirkan melalui suatu ruang

dengan kecepatan rendah sehingga memberikan waktu yang cukup bagi partikulat untuk mengendap secara gravitasi ke bagian pengumpul debu (*dust collecting hoppers*).

#### **2.3.1.3 *Fabric Filter/ Baghouse***

Unit pengendali pencemaran udara yang menyisihkan partikulat melalui mekanisme impaksi, intersepsi dan difusi. *Fabric filter* menggunakan bahan filter seperti nilon atau wol untuk menyisihkan partikulat dari aliran gas.

#### **2.3.1.4 Siklon**

Peralatan mekanis yang digunakan untuk menyisihkan partikulat dengan ukuran >5 mikron dengan efisiensi penyisihan 50 – 90 %. Prinsip kerja siklon yaitu dengan memanfaatkan gaya sentrifugal dan inersia dari gas buangan. Udara yang mengandung partikulat.

#### **2.3.1.5 *Electrostatic Precipitator (EP)***

Teknologi pengendali pencemar partikulat yang didasari pada konsep presipitasi akibat gaya elektrostatis. EP sangat efektif sebagai pengndali partikulat yang berukuran kurang dari 10 mikron. Pemberian muatan listrik oleh *precipitator discharge electrode* disebut sebagai *corona discharge*. Partikel diberikan muatan negatif sehingga menimbulkan gaya elektrostatis. Gaya ini akan berinteraksi sehingga partikulat akan mengalami presipitasi pada system pengumpul (berbentuk plat atau tabung) yang bermuatan positif. Setelah menempel pada bidang pengumpul maa akan terjadi *discharging* muatan hingga kolektor ternetralisir oleh jumlah partikulat bermuatan yang menempel.

### **2.3.2 Teknologi Pengendali Gas Pencemar Udara**

#### **2.3.2.1 *Adsorber***

Unit pengendali gas yang menggunakan prinsip adsorpsi. Adsorpsi adalah suatu proses tertahannya pencemar gas yang terdapat dalam aliran gas yang terdapat dalam aliran gas buang pada suatu permukaan padat. Adsorben adalah permukaan padat yang mampu menarik molekul gas pencemar (seperti karbon aktif, *silica gel*, alumina aktif), adsorbat adalah molekul gas pencemar

yang tertahan pada permukaan padat (seperti senyawa organik volatil, *thinner* cat, pelarut).

#### **2.3.2.2 Absorber/Scrubber**

Unit pengendali gas yang menggunakan prinsip absorpsi. Absorpsi adalah mekanisme dimana satu atau lebih zat pencemar dalam aliran gas dieliminasi atau dihilangkan dengan melarutkannya dalam cairan.

#### **2.3.2.3 Kondensor**

Unit pengendali gas yang menggunakan prinsip kondensasi, yaitu proses penyisihan gas pencemar dengan cara merubah fasa dari fasa gas ke fasa cair. Kondensor berbentuk sederhana, relatif murah dan biasanya menggunakan air atau udara untuk mendinginkan dan mengkondensasikan uap. Umumnya digunakan sebelum *adsorber*, *absorber* atau incinerator untuk mengurangi total massa gas buang yang akan diolah.

#### **2.3.2.4 Combustion**

Unit pengendali yang bekerja dengan prinsip oksidasi, digunakan untuk mengendalikan senyawa organik volatil (VOC) dan senyawa-senyawa beracun. Pada temperatur yang cukup tinggi dan waktu tinggal yang cukup, senyawa organik dapat dioksidasi membentuk CO<sub>2</sub> dan uap air. Oksidasi senyawa organik yang mengandung klorin dan fluorin atau sulfur dapat berupa HCl, HF, Cl<sub>2</sub>, atau SO<sub>2</sub>.

### **2.4 Identifikasi Emisi Gas Buang pada Peleburan Baja di *Billet Steel Plant* (BSP)**

*Billet Steel Plant* (BSP) melakukan proses produksi dari bahan besi *spons*. Besi *spons* ini akan dilebur bersama *scrap* dan bahan tambah lainnya, seperti ganit, dolomit, dan batu kapur. Proses pembuatan *billet* baja di BSP terbagi dalam tiga tahap utama, yaitu proses peleburan dan pemurnian di dapur EAF (*Electric Arc Furnace*), proses pemurnian sekunder dan proses pengecoran kontinyu di CCM (*Continuous Casting Machine*).

Peleburan baja di BSP banyak menimbulkan masalah, khususnya pada kualitas udara. Beberapa tahapan dalam proses

peleburan baj secara actual menimbulkan emisi berupa gas dan partikel debu. Sehingga menyebabkan pencemaran udara. Umumnya debu terbentuk karena adanya partikel – partikel halus yang terbentuk secara mekanik keluar dari tanur dan atau adanya senyawa yang mudah menguap dan keluar dari tanur. Untuk menangani hal tersebut PT Krakatau Steel (Persero) Tbk., menggunakan *dedusting system* sebagai salah satu langkah pengendalian pencemaran udara. Selain itu diadakan pula pemantauan berkala setiap enam bulan dua kali pada cerobong. Khusus untuk partikulat dan opasitas pemantauan dilakukan setiap hari dengan menggunakan CEMs. Pemantauan emisi gas ini menggunakan dasar peraturan dari Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 13 tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber tidak Bergerak. Berikut salah satu hasil pengukuran uji emisi di BSP.

**Tabel 2.2** Hasil Uji Emisi pada *Billet Steel Plant* (BSP), *Billet* Barat, Februari 2014

Parameter	Hasil Uji	Satuan
Nirogen Oksida	3	mg/Nm <sup>3</sup>
Partikel Debu	12,9	mg/m <sup>3</sup>
Sulfur Dioksida	0	mg/Nm <sup>3</sup>
Oksigen	19,9	%
Karbon Monoksida	1236	mg/Nm <sup>3</sup>
Karbon Dioksida	0,3	%
Nitrogen Dioksida	21	mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	17	mg/Nm <sup>3</sup>
T-Gas	84	°C
Opasitas	3	%

Sumber: Laporan Hasil Pengujian Emisi Udara, Laboratorium Lingkungan PT Krakatau Steel (Persero)

Debu yang telah dikumpulkan oleh *dedusting system* akan berupa serbuk berwarna hitam kecoklaan, sedikit berbau, dan larut dalam air. Pada perkembangannya debu tersebut dapat dimanfaatkan sebagai campuran bahan baku di industri semen. Kini dimanfaatkan oleh pihak ketiga yang telah mempunyai izin pemanfaatan limbah B3 dari Kementerian Lingkungan Hidup. Gas yang dibuang ke udara adalah gas yang telah difilter dengan *dedusting system* sehingga diharapkan sudah memenuhi standar



bak mutu yang berlaku. Berikut spesifikasi debu hasil keluaran *dedusting system*.

**Tabel 2.3** *Chemical Test* pada Limbah Debu EAF

Kandungan	Prosentase (%)
Fe <sup>2+</sup>	12,93
Fe Total	47,78
Fe Metal	2,45
SiO	3,38
CaO	8,68
MgO	9,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,10
TiO <sub>2</sub>	0,24
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08
MnO	2,17
P	0,106
S	1,08
H <sub>2</sub> O	1

Sumber: Laboratorium Divisi HSE PT Krakatau Steel (Perseo) Tbk

Berikut beberapa contoh emisi yang dihasilkan oleh industri peleburan besi dan baja.

1. Total Partikel

Partikulat adalah zat padat/cair yang halus dan tersuspensi di udara, misalnya embun, debu, asap, *fumes*, dan *fog*. Debu adalah zat padat 0,1 – 25 mikron, sedangkan *fumes* adalah zat padat hasil kondensasi gas yang biasanya terjadi setelah proses penguapan logam cair. Dengan demikian *fumes* berukuran sangat kecil yakni kurang dari 1,0 mikron. Asap adalah karbon (C) yang berdiameter kurang dari 0,1 mikron, akibat dari pembakaran hidrat karbon yang kurang sempurna, demikian pula halnya dengan jelaga.

2. Sulfur Dioksida (SO<sub>2</sub>)

Gas SO<sub>2</sub> telah lama dikenal sebagai gas yang dapat menyebabkan iritasi pada sistem pernapasan, seperti pada selaput lendir hidung, tenggorokan dan saluranudara di paru – paru. Efek kesehatan ini menjadi lebih buruk pada penderita asma. Disamping itu SO<sub>2</sub> terkonversi di udara menjadi pencemar sekunder seperti aerosol sulfat.

Aerosol yang dihasilkan sebagai pencemar sekunder umumnya mempunyai ukuran yang sangat halus sehingga dapat terhisap ke dalam sistem pernapasan. Aerosol sulfat yang masuk ke dalam saluran pernapasan dapat menyebabkan dampak kesehatan yang lebih berat daripada partikel – partikel lainnya karena mempunyai sifat korosif dan karsinogen.

3. Nitrogen Dioksida ( $\text{NO}_x$ )

$\text{NO}_x$  adalah bentuk yang lebih reaktif dari oksida nitrogen yang terdiri dari nitrogen monoksida ( $\text{NO}$ ) dan nitrogen dioksida ( $\text{NO}_2$ ).  $\text{NO}_2$  berwarna coklat kemerahan, sangat reaktif, dan terbentuk di udara dari oksidasi  $\text{NO}$ .

## 2.5 Karakteristik Emisi

Karakteristik emisi adalah data yang sangat penting untuk memilih jenis pengendalian pencemaran udara yang cocok. Karakteristik emisi yang dibutuhkan antara lain; laju emisi, temperatur gas buang, *pollutant loading*, kelembaban relatif, dan *particle size distribution*.

## 2.6 Blast Furnace

Teknologi *blast furnace* adalah teknologi yang sangat dominan digunakan untuk memproduksi besi wantah (*pig iron*) sebagai bahan baku untuk menghasilkan baja. Teknologi *blast furnace* adalah teknologi yang sudah mapan dan sudah dikembangkan sejak tahun 1600-an. Keunggulan teknologi *blast furnace* adalah efisiensi energy yang baik dan produktivitas tinggi. Untuk mengokah bijih besai di Indonesia, teknologi *blast furnace* dan teknologi *direct reduction* lebih disarankan untuk digunakan. Keterbatasan penggunaan teknologi *blast furnace* adalah kebutuhan dan ketergantungan pada *coking coal* yang cadangannya terbatas di Indonesia.

## 2.7 Wet Scrubber

*Wet scrubber* adalah alat pengontrol polusi udara untuk menghilangkan PM dan gas pencemar lainnya yang bersifat asam pada aliran gas buangan dari sumber. Polutan dihilangkan terutama melalui impaksi, difusi, intersepsi dan/atau absorpsi polutan ke

*droplet*. Cairan yang mengandung polutan kemudian dikumpulkan untuk dibuang. Ada banyak jenis *wet scrubber* untuk menghilangkan gas asam dan PM.

Efisiensi pengumpulan untuk *wet scrubber* bervariasi. Secara umum, efisiensi pengumpulan menurun karena ukuran PM yang juga menurun. Efisiensi pengumpulan juga bervariasi dengan jenis scrubber. Efisiensi pengumpulan berkisar dari lebih dari 99% untuk *venturi scrubber* sampai 40-60% (atau lebih rendah) untuk *spray tower*.

Sistem *wet scrubber* memiliki beberapa kelebihan dibanding presipitator elektrostatis (ESP) dan *baghouse*. *Wet scrubber* lebih kecil dan lebih kompak daripada *baghouses* atau ESP. *wet scrubber* memiliki *capital cost* dan *operational and maintainance (O&M) cost* yang lebih rendah. *Wet scrubber* sangat berguna dalam menghilangkan PM dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Bahan yang mudah menyerap air;
2. Bahan mudah terbakar, korosif dan mudah meledak;
3. Partikel yang sulit dilepas dalam bentuk kering;
4. PM dengan adanya gas larut; dan
5. PM di aliran gas buangan dengan kadar air tinggi.

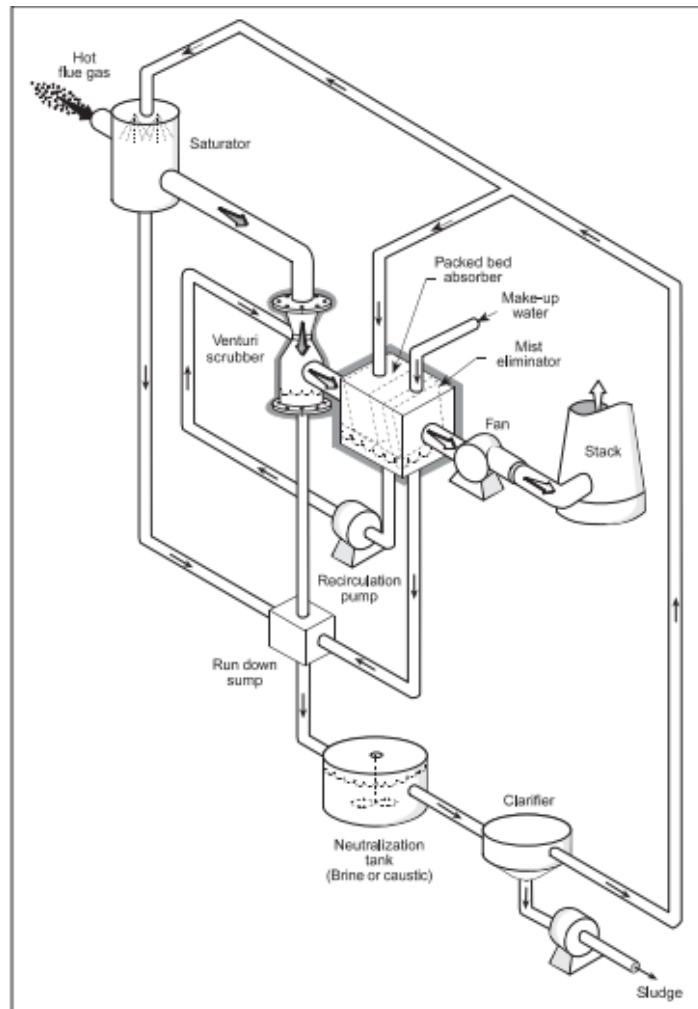
*Wet scrubber* memiliki banyak aplikasi di bidang industri yaitu *boiler*, insinerator, pengolahan logam, produksi bahan kimia, produksi aspal, dan produksi pupuk.

Kelemahan utama dari *wet scrubber* adalah bahwa peningkatan efisiensi pengumpulan terjadi pada *pressure drop* yang tinggi. Kelemahan lainnya adalah terbatasnya tingkat aliran gas buangan dan suhu dibandingkan dengan ESPs atau *baghouses*. Desain *wet scrubber* saat ini mengakomodasi laju alir udara di atas 47 m<sup>3</sup>/s (100.000 acfm) dan suhu hingga 400° C (750° F). Kelemahan lainnya adalah *wet scrubber* menghasilkan limbah dalam bentuk lumpur yang memerlukan pengolahan dan/atau pembuangan. Terakhir, masalah korosi dan *plume visibility* kecuali uap air yang ditambahkan dikeluarkan dari aliran gas.

*Wet scrubber* umumnya terdiri dari komponen berikut

1. Saluran dan sistem fan
2. Ruang pengendap (opsional)
3. *Scrubbing vessel*
4. *Mist eliminator*

5. Pompa
6. Pengolahan air bekas *scrubber*
7. *Exhaust stack*



**Gambar 2.1** Sistem *Scrubber*

## 2.8 Mekanisme *Scrubber*

Partikulat tertangkap oleh *droplet* pada *wet scrubber* melalui beberapa mekanisme yaitu.

1. Impaksi adalah mekanisme penangkapan primer. Ketika gas buang mendekati tetesan air, arus mengalir sepanjang arus di sekitar tetesan. Partikel dengan kekuatan inersia yang cukup mempertahankan lintasan ke depan dan berdampak pada tetesan. Karena massanya,

partikel dengan diameter lebih besar dari 10  $\mu\text{m}$  umumnya dikumpulkan dengan impaksi. Aliran turbulen meningkatkan penangkapan dengan impaksi.

2. Partikel yang didominasi oleh gaya tarik pada fluida mengikuti arus gas buangan. Namun, partikel yang melewati cukup dekat dengan *droplet* ditangkap dengan cara intersepsi, ditangkap karena tegangan permukaan pada *droplet*. Partikel berdiameter kira-kira 1,0 sampai 0,1  $\mu\text{m}$ . Meningkatkan densitas *droplet* dalam semprotan meningkatkan pula mekanisme tersebut.
3. Partikel berukuran sangat kecil menggunakan mekanisme gerak Brown, gerak tidak teratur yang disebabkan oleh benturan acak dengan molekul gas. Partikel-partikel ini ditangkap oleh *droplet* saat mereka menyebar melalui. Koleksi karena difusi paling penting untuk diameter partikel kurang dari 0,5  $\mu\text{m}$ .
4. Mekanisme penangkapan yang jarang jarang digunakan meliputi kondensasi dan elektrostatis. Pada kondensasi, aliran gas jenuh dengan uap air dan partikelnya ditangkap saat air mengembun pada partikel. Pada elektrostatis, kontak ditingkatkan dengan menempatkan muatan elektrostatis pada partikel, *droplet*, atau keduanya.

## **2.9 Jenis-jenis Scrubber**

### **2.8.1 Spray Tower**

Jenis scrubber yang paling sederhana adalah *spray tower*. Pada *spray tower*, udara sarat partikel masuk ke dalam ruang untuk disemprotkan cairan yang dihasilkan oleh *nozzle*. *Nozzle* dapat diarahkan berlawanan dengan aliran gas, ke arah yang sama dengan aliran gas, atau tegak lurus terhadap aliran gas. *Droplet* menangkap partikel yang tersuspensi dalam aliran gas melalui impaksi, intersepsi dan difusi. *Droplet* cukup besar untuk mengendap dengan gravitasi. *Droplet* yang tetap terbawa dalam aliran gas dikumpulkan pada *mist eliminator*.

*Spray tower* mengandalkan pengumpulan partikel dengan impaksi. Oleh karena itu, memiliki efisiensi pengumpulan yang tinggi untuk PM kasar. Efisiensi tipikal sebesar 90% untuk partikel yang lebih besar dari 5  $\mu\text{m}$ . Efisiensi untuk partikel berdiameter 3-5  $\mu\text{m}$  berkisar 60-80%. Di bawah 3  $\mu\text{m}$ , efisiensi menurun menjadi kurang dari 50%.

*Spray tower* memiliki *capital cost* lebih rendah daripada *wet scrubber* lainnya. Selain itu, *spray tower* umumnya memiliki konsumsi daya rendah dan tidak rentan terhadap pengotoran, sehingga biaya operasional juga turun. Biaya operasi *spray tower* meningkat untuk aplikasi PM halus, karena sistem semacam itu memerlukan rasio cairan terhadap gas yang tinggi (lebih dari 20 gal/1000 ft<sup>3</sup>). Tingkat aliran gas tipikal untuk *spray tower* adalah 1 - 47 m<sup>3</sup>/s (1.500 - 100.000 scfm).

### **2.8.2 Cyclonic Spray Tower**

*Cyclonic spray tower* berbeda dengan desain *spray tower* karena aliran gas buang mengalir melalui ruang dalam gerakan siklon. Gerakan siklon diproduksi dengan memposisikan inlet gas tangensial ke dinding ruang *scrubber* atau dengan menempatkan baling-baling di dalam ruang *scrubber*. Inlet gas meruncing sehingga kecepatan gas meningkat saat memasuki menara. Cairan *scrubber* disemprotkan dari *nozzle* di inlet atau dari puncak. Gambar 2.2 menunjukkan diagram menara semprot siklon dengan inlet tangensial. *Droplet* yang masuk dalam aliran gas mengalami gaya sentrifugal akibat gerakan memutar, menyebabkan *droplet* berpindah ke dinding menara. Tetesan itu menabrak dinding menara dan jatuh ke dasar menara. *Droplet* yang tetap dalam gas dapat dihilangkan dengan *mist eliminator*.

*Cyclonic spray tower* memiliki efisiensi pengumpulan yang lebih besar dari pada *spray tower* sederhana karena kecepatan relatif yang lebih besar antara *droplet* dan gas buang di menara siklon. Efisiensi pengumpulan untuk jenis *scrubber* ini setinggi 95% untuk partikel lebih besar dari 5  $\mu\text{m}$ , dan 60% - 75% untuk partikel submikron. Kecepatan aliran gas berkisar antara 1 - 47 m<sup>3</sup>/s (1.500 - 100.000 scfm), dan daya untuk *scrubber* siklon umumnya 1 - 3,5 hp / 1000 cfm. *Capital cost* dan O&M *cost* sedikit lebih tinggi untuk *scrubber* jenis ini karena rancangannya yang lebih kompleks.

### 2.8.3 *Dynamic Scrubber*

*Dynamic scrubber* juga dikenal sebagai *scrubber* elektrik atau *disintegrator scrubber*. Jenis *scrubber* ini mirip dengan *spray tower*, namun dengan penambahan *powerdriven rotor* yang memecah cairan *scrubber* ke *droplet* halus. Rotor dapat ditempatkan di dalam menara atau di luar Menara dan dihubungkan oleh saluran. *Mist eliminator* berfungsi untuk menghilangkan cairan dan menangkap partikulat. Umumnya, sistem *dynamic scrubber* melembabkan gas buang di hulu rotor untuk mengurangi penguapan dan pengendapan partikel di daerah rotor.

*Dynamic scrubber* secara efisien menghilangkan PM halus, namun penambahan rotor ke sistem *scrubber* meningkatkan biaya perawatan. PM besar menghalangi rotor dan gas yang lembab menyebabkan korosi. Alat *pretreatment*, seperti siklon, sering digunakan sebelum *dynamic scrubber* untuk menghilangkan PM yang besar. Konsumsi daya juga tinggi untuk jenis *scrubber* ini yaitu, 4 - 10 kilowatt (kW)/1000 acfm. *Dynamic scrubber* umumnya dapat menangani laju alir gas antara 1.000 - 50.000 scfm. Efisiensi pengumpulan untuk *dynamic scrubber* serupa dengan *cyclonic spray tower*. *Capital cost* dan O&M cukup tinggi daripada *spray tower* sederhana karena penambahan rotor.

### 2.8.4 *Tray Tower*

*Tray tower scrubber* terdiri dari menara vertikal dengan beberapa plat berlubang yang dipasang secara horizontal di menara. Gas memasuki menara di bagian bawah dan bergerak ke atas melalui lubang di plat, sementara cairan *scrubber* mengalir dari atas dan melintasi setiap plat. Kecepatan gas mencegah agar cairan tidak mengalir melalui lubang di plat. *Tray tower* dirancang untuk menyediakan akses ke setiap plat untuk pembersihan dan perawatan. PM yang besar bisa menyumbat lubang, oleh karena itu, beberapa desain menempatkan hulu *impingement baffle* di setiap lubang untuk mengeluarkan PM yang besar. Jenis *tray tower* ini disebut sebagai *scrubber impactor*.

*Tray tower* tidak secara efektif menghilangkan partikel submikron, namun efisiensi pengumpulan 97% dimungkinkan untuk partikel yang lebih besar dari 5  $\mu\text{m}$ . *Tray tower* juga secara efektif menghilangkan gas terlarut. Kecepatan aliran gas untuk

desain *tray tower* umumnya antara 1.000 sampai 75.000 scfm. *Liquid to gas ratio* rendah dibandingkan dengan *spray tower* dan *venturi scrubber*. *Capital* dan *O&M cost* *tray tower* dan *impingement* sedikit lebih tinggi dari pada *spray tower* sederhana.

#### **2.8.5 Venturi Scrubber**

Sebuah *venturi scrubber* memiliki saluran "konvergen-divergen". Pada jenis sistem ini, luas penampang saluran menurun kemudian meningkat sepanjang saluran. Daerah tersempit disebut sebagai *throat*. Pada bagian konvergen, penurunan luas menyebabkan kecepatan gas buang dan turbulensi meningkat. Cairan *scrubber* disuntikkan ke dalam *scrubber* sedikit ke ujung *throat* atau langsung ke bagian tersebut. Cairan *scrubber* dikabutkan oleh turbulensi di *throat*, sehingga meningkatkan kontak antara gas dan cairan. Campuran tersebut kemudian melambat saat bergerak melalui bagian divergen, menyebabkan aglomerasi tetesan. *Droplet* kemudian dipisahkan dari aliran gas di bagian *entrainment*, biasanya terdiri dari separator siklon dan *mist eliminator*. Desain, operasi dan biaya scrubber venturi adalah fokus bab ini dan dibahas secara lebih rinci pada Bagian 2.9.

*Venturi scrubber* lebih mahal dari *spray tower*, *cyclonic*, atau *tray tower scrubber*, namun efisiensi koleksi untuk PM halus lebih tinggi. Kecepatan gas yang tinggi dan turbulensi di *venturi throat* menghasilkan efisiensi pengumpulan yang tinggi, berkisar antara 70% sampai 99% untuk partikel dengan diameter yang lebih besar dari 1  $\mu\text{m}$  dan lebih besar dari 50% untuk partikel submikron. Meningkatnya *pressure drop* pada *venturi scrubber* meningkatkan efisiensinya. Namun permintaan energi pada sistem juga meningkat sehingga menyebabkan biaya operasional lebih besar. *Capital* dan *O&M cost* cukup tinggi daripada biaya untuk *spray tower* sederhana.

#### **2.8.6 Orifice Scrubber**

Pada *orifice scrubber*, juga disebut sebagai *scrubber* impaksi, aliran gas mengalir di atas permukaan kolam cairan *scrubber*. Gas buang kemudian mengalir ke atas dan memasuki lubang dengan celah yang lebih sempit dari pada duktus. *Orifice* menginduksi turbulensi pada aliran yang mengionisasi *droplet*. *Droplet* atomisasi menangkap PM dalam aliran gas. Serangkaian



baffle kemudian menghilangkan tetesan, yang jatuh ke dalam penampung di bawahnya. Beberapa *orifice scrubber* memiliki lubang yang dapat diatur untuk mengendalikan kecepatan gas. *Orifice scrubber* mengakomodasi laju alir gas hingga 50.000 scfm dan pembebanan partikel hingga 23 g/m<sup>3</sup> (10 butir/scf). Keuntungan utama dari jenis *scrubber* ini adalah menghilangkan pompa resirkulasi untuk cairan *scrubber*, yang merupakan beban utama biaya operasi. Kekurangannya adalah sulitnya membuang limbah lumpur. Dalam kebanyakan desain *scrubber*, limbah terus mengalir dari dasar. *Orifice scrubber* menggunakan penampung cairan *scrubber* statis, sehingga limbah lumpur dibuang dengan menggunakan *sludge ejector*, yang beroperasi seperti ban berjalan.

*Orifice scrubber* tidak banyak digunakan, namun telah diterapkan pada pengering, penggilingan, operasi semprot (pelapis pil, kaca keramik), ventilasi (operasi pembuangan), dan penanganan material. Jenis *scrubber* ini dapat secara efektif menghilangkan PM dengan diameter lebih dari 2 µm, dengan efisiensi kontrol berkisar antara 80-99%. *Capital* dan O&M cost jauh lebih tinggi daripada untuk *spray tower* sederhana.

### 2.8.7 Desain Lainnya

*Packed tower scrubber* adalah *scrubber* yang berisi *packing material*. *Packing material* menyediakan permukaan yang besar untuk kontak antara gas dan cairan. Cairan *scrubber* dimasukkan di bagian atas menara dan mengalir turun melalui *packing material* dan membentuk lapisan film. *Packing material* tersedia dalam berbagai bentuk, masing-masing memiliki karakteristik spesifik berkaitan dengan luas permukaan, *pressure drop*, berat, ketahanan terhadap korosi, dan biaya. *Packed tower scrubber* paling sering digunakan untuk penyerapan gas, karena konsentrasi partikel yang tinggi dapat terbentuk pada material dan menyumbat menara.

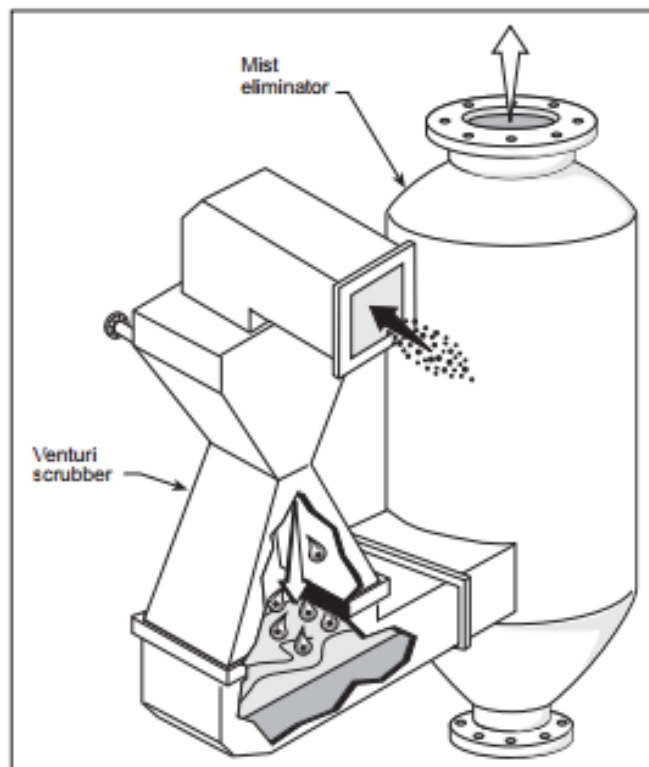
*Charged scrubber* meningkatkan penhilangan partikel dengan memberikan muatan elektrostatis pada *droplet*, partikel, atau keduanya sebelum memasuki *scrubber*. *Scrubber* ini biasanya menggunakan desain *scrubber* konvensional, seperti *spray tower*. Partikel dapat bermuatan negatif atau positif, dengan *droplet* diberi muatan sebaliknya. ESP basah adalah perangkat

serupa yang menggabungkan ESP dengan cairan mengalir untuk membersihkan pelat elektrostatis secara kontinu.

*Wet scrubber* yang tersedia secara komersial menggunakan beragam variasi desain, termasuk beberapa teknologi hibrida. Misalnya, beberapa produsen menawarkan *venturi scrubber* dengan beberapa *throat*. Pabrikan lain menggabungkan perangkat *wet scrubber* dengan jenis penghilangan partikel lainnya, seperti *baghouse* atau ESP.

## 2.10 Venturi Scrubber

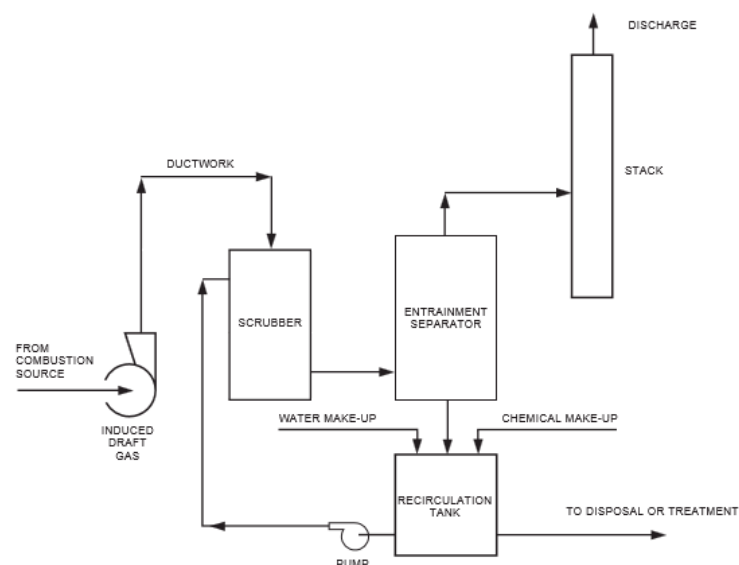
*Venturi scrubber* merupakan alat pengendalian pencemaran udara yang dipilih untuk perencanaan ini dan memiliki tingkat efisiensi sampai dengan 99%. Kecepatan *gas stream* yang memasuki *venturi scrubber* ini adalah sebesar 15.000 ft/min – 40.000 ft/min. Alat ini memiliki saluran yang dapat disesuaikan. *Venturi scrubber* merupakan *scrubber* yang paling populer digunakan untuk mengeliminasi partikulat dan juga sebagai alat yang paling dianjurkan untuk pabrik *steel* dan *iron making* (U.S. EPA, 1998).



Gambar 2.2 Venturi Scrubber

Ada tiga tipe dasar *venturi scrubber*. Perbedaan utama antar konfigurasi adalah energi yang dibutuhkan untuk menghilangkan gas buang dan memindahkannya melalui unit. Dalam *venturi* konvensional, perangkat eksternal, *induced draft* (ID) fan, yang mentransfer energi dari gas ke cair. Kipas ID bisa berada di hulu atau hilir unit *scrubber*. Desain *venturi scrubber* dasar sangat efisien dalam menghilangkan PM<sub>10</sub> dari segi biaya dan kinerja. Dalam *venturi* "jet" atau "eduktor", cairan *scrubber* bertekanan disuntikkan ke dalam *throat*. Jenis *venturi* ini beroperasi pada tekanan rendah. *Venturi* jet memiliki efisiensi pengumpulan yang lebih rendah untuk PM yang halus daripada *venturi* konvensional. *Venturi* "energi tinggi" memiliki efisiensi yang tinggi untuk pengumpulan PM halus dan submikron. Sistem energi tinggi menggunakan kipas ID yang besar untuk membuat penurunan tekanan sisi gas yang tinggi, 30 inci kolom air atau lebih. Hal ini sangat meningkatkan kecepatan gas buang sebelum memasuki *throat* dan menghasilkan efisiensi pengumpulan yang tinggi. Namun, *capital cost* dan kebutuhan tenaga listrik untuk sistem energi tinggi jauh lebih tinggi daripada *venturi* konvensional.

Sistem *venturi* dapat dipasang pada aliran gas horisontal atau vertikal. Bahan konstruksi untuk komponen sistem meliputi baja karbon, baja tahan karat, *duplex alloy*, FRP atau baja berjajar. Sifat gas buangan menentukan bahan mana yang paling sesuai untuk sistem. Lebih dari satu jenis material bisa dimasukkan ke dalam sistem *venturi* jika perlu.



**Gambar 2.3** Skematik Sistem *Venturi Scrubber*

Gambar 2.3 menyajikan skematik sistem *venturi*. Komponen dasar dari *venturi scrubber* adalah:

1. Sistem penyimpanan cairan dan sistem pembawa
2. Sistem injeksi cairan
3. *Venturi throat section*
4. Ruang pengumpul dengan *mist eliminator*
5. Sistem pengumpul limbah cair dan pembuangan
6. Instrumentasi dan kontrol
7. Peralatan bantu

Masing – masing komponen dibahas dalam bagian berikut.

### **2.9.1 Sistem Penyimpanan Cairan dan Sistem Pembawa**

Sistem penyimpanan dan pengiriman cairan terdiri dari tangki resirkulasi, pompa, filter, katup, pipa, alat pengukur tekanan, dan *flow meter*. Sebagian besar sistem dirancang sebagai sistem daur ulang, yang berarti cairan pembersih bekas digunakan kembali. Karena cairan *scrubber* didaur ulang, kandungan padatan cairan meningkat saat PM dikumpulkan. Konsentrasi padatan dalam sistem daur ulang harus dijaga sesuai desain. Untuk mengurangi konsentrasi padatan, sebagian cairan dikeluarkan dari sistem dan cairan *scrubber* baru ditambahkan. Volume cairan baru juga mencakup volume air yang hilang akibat penguapan oleh gas panas.

Tangki harus memiliki ukuran yang sesuai untuk memelihara jalannya sistem secara kontinu dan meminimalkan pergantian cairan. Sensor di tangki memonitor tingkat cairan. Sistem otomatis untuk menambahkan cairan dapat dimasukkan ke dalam desain *scrubber*. Namun, tangki yang terlalu besar dan penambahan sistem otomatis dapat menambah *capital cost* dan kompleksitas sistem. Kenaikan *capital cost* dapat mempengaruhi biaya O&M untuk mengoperasikan sistem secara manual.

Padatan dapat dihilangkan dari cairan *scrubber* menggunakan beberapa metode yang berbeda. Pada satu metode, cairan *scrubber* diberikan secara gravitasi ke satu set saringan yang terletak di bagian hulu pompa untuk menghilangkan padatan. Filter umumnya terbuat dari *stainless steel* dan dapat

dilepas untuk pembersihan dan penggantian. Metode penyisihan padatan lainnya meliputi *liquid cyclone* atau tangki pengendapan.

Setelah meninggalkan tangki, cairan *scrubber* mengalir ke pompa untuk meningkatkan tekanan dan laju aliran. Alat pengukur tekanan dan *flow meter* di bagian hilir pompa memonitor aliran cairan *scrubber* dan operasi pompa.

### 2.9.2 Sistem Injeksi Cairan

Desain sistem injeksi mendukung pencampuran gas buang dan cairan *scrubber* di *venturi*. Ada dua sistem dasar untuk menyuplai cairan *scrubber* ke dalam sistem *venturi*: pipa terbuka dan *spray nozzle*. Sistem injeksi umumnya berada di saluran gas buang, langsung di bagian hulu bagian *venturi scrubber*. Pada kedua sistem, cairan disuntikkan ke arah yang sama dengan aliran gas buangan. Sebagian besar sistem injeksi dibuat dari bahan *stainless steel* atau bahan non korosif lainnya.

Pada sistem pipa terbuka, beberapa pipa berdiameter kecil menyuplai cairan *scrubber* ke bagian saluran. Pipa-pipa menyuplai cairan secara tangensial, di sepanjang dinding saluran atau secara radial ke pelat penyekat. Air mengalir ke bawah, menutupi dinding duktus. Sistem perpipaan dirancang agar seluruh luas permukaan bagian dibanjiri cairan *scrubber*. Ini memastikan bahwa tidak ada zona transisi kering/basah. Area kering/basah menyebabkan terbentuknya padatan pada dinding saluran yang mengganggu pengoperasian *scrubber*. Gas sarat debu memasuki *scrubber* secara vertikal dari atas dan langsung menyentuh lapisan cairan *scrubber*. Di bagian *throat*, aliran gas buang menjadi sangat turbulen dan cairan *scrubber* dipecah untuk membentuk dispersi *droplet*. Sistem pipa terbuka memiliki *capital cost* dan O&M yang lebih rendah daripada *spray nozzle* karena desainnya yang lebih sederhana.

Sistem *spray nozzle* disebut sebagai *jet venturi* atau *eductor venturi*. Sistem ini menyuplai cairan melalui *nozzle* untuk membuat pola semprotan *droplet* halus. *Droplet* dapat diproduksi baik secara pneumatik atau hidrolik dengan menggunakan kepala *nozzle* yang dirancang khusus. Sementara semprotan *nozzle* memperbaiki pencampuran antara cairan *scrubber* dan gas buang, pada umumnya jenis ini memiliki *capital* dan O&M *cost* yang lebih

tinggi daripada sistem pipa terbuka karena membutuhkan daya pompa yang tinggi untuk jenis sistem ini.

Pada *jet venturi*, *nozzle* bisa menempel di dinding duktus atau bisa berada di bagian penampang saluran. Untuk area *throat* yang lebarnya lebih dari 1 kaki, *spray nozzle* harus ditempatkan di tengah duktus untuk memastikan adanya kontak PM dan cairan yang cukup. *Nozzle* dapat dibuat dari bahan *stainless steel* atau lebih khusus seperti *stellite* dan keramik. Karena *nozzle* rentan terhadap sumbatan dan abrasi pada kondisi beban PM yang tinggi, jenis sistem ini memerlukan cairan *scrubber* bersih untuk menghindari penyumbatan. Temperatur tinggi dan kecepatan gas dapat merusak *nozzle*, akibatnya, harus dirancang agar mudah dilepas untuk pembersihan dan penggantian.

### **2.9.3 Venturi Throat Section**

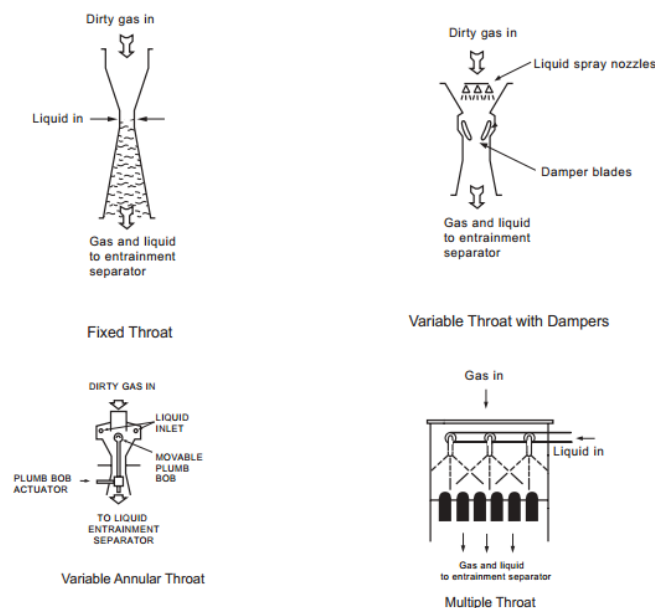
*Throat* adalah bagian tersempit dari *venturi* konvergen-divergen. Di sinilah kecepatan dan turbulensi gas buangan paling besar. Di *throat*, gas buangan memecah cairan *scrubber* menjadi *droplet* halus dengan distribusi kepadatan yang tinggi. *Droplet* ini mengumpulkan PM melalui impaksi. Cairan buangan dan cairan *scrubber* kemudian masuk ke bagian divergen dimana kecepatan menurun, menyebabkan impaksi dan penggumpalan cairan. Sebagian energi yang dilepaskan ke sistem cair ke gas diperoleh kembali di bagian divergen sebagai tekanan gas. Namun, keseluruhan energi sistem menurun akibat gesekan dan kerugian mekanis lainnya. Kehilangan ini diukur sebagai penurunan tekanan di bagian *venturi* konvergen-divergen, yang disebut *pressure drop*,  $\Delta P$

Terdapat sejumlah bentuk *throat* yang tersedia secara komersial, termasuk *fixed throat*, *throat* bervariasi, *variable annular throat*, dan *multiple throat*. Gambar 2.4 menyajikan skema *fixed throat*, *throat* bervariasi, *variable annular throat*, dan *multiple throat*.

*Fixed throat venturi* adalah jenis *venturi* yang paling sederhana. Bagian *throat* bisa berbentuk lingkaran atau persegi panjang, tergantung pada bentuk saluran dari sistem gas buangnya. *Throat* berbentuk persegi panjang umumnya terbatas pada lebar sekitar 10 inci karena pertimbangan pencampuran. *Throat* berbentuk lingkaran biasanya digunakan dalam aplikasi bertekanan tinggi.

Variasi *throat venturi* mengubah luas penampang *throat* melalui penggunaan *damper* yang dapat disesuaikan. Ada banyak desain *damper* yang berbeda termasuk *conical plug*, cakram, dan bilah. Area *throat venturi* dapat bertambah atau berkurang menggunakan *damper* saat gas buang masuk. Hal ini memungkinkan *venturi* untuk mempertahankan kecepatan pada *throat*, oleh karena itu, efisiensi pengumpulan dapat dipertahankan bahkan dengan fluktuasi aliran gas buangan. Sistem kontrol dapat dimasukkan ke dalam perangkat *variable throat* untuk secara otomatis menyesuaikan dengan perubahan aliran gas. Penyesuaian *throat* secara otomatis biasanya digunakan pada kondisi aliran gas yang sangat bervariasi dan sering diperlukan penyesuaian. Kompleksitas *variable throat* meningkatkan *capital* dan *O&M cost venturi*.

*Multiple throat venturi* adalah satu set *venturi* paralel dalam satu bagian saluran. *Throat* dibuat dengan batang panjang atau pelat datar yang terletak di bagian penampang saluran. Jumlah *throat* dan lebar *throat* bervariasi sesuai desain. Sebagian besar sistem memiliki *throat* dengan lebar 1 - 2 inci. *Throat* dapat dirancang tetap atau variabel. Jenis desain ini tidak hanya menurunkan area *throat* tapi juga meningkatkan area basah *venturi*, sehingga menghasilkan efisiensi pengumpulan yang lebih tinggi. Sistem ini bekerja secara efisien dalam aplikasi bertekanan rendah.



**Gambar 2.4** Jenis – Jenis Nozzle

#### 2.9.4 Ruang Pengumpul dengan *Mist Eliminator*

Setelah melewati bagian *venturi*, cairan *scrubber* dan gas buang masuk ke ruang pengumpul yang memisahkan *droplet* dari gas buang. Sebagian *droplet* mengendap melalui gravitasi di bagian dasar. *Droplet* yang tetap masuk dalam gas umumnya dihilangkan dengan *mist eliminator*. Saluran terletak di bagian bawah ruang pengumpul untuk mengalirkan limbah cair. Ruang pengumpul dapat didesain secara sederhana seperti, menara dengan *baffle*, atau *cyclone*. Desain *baffle* and *cyclone* meningkatkan pemisahan cairan dan PM dari aliran gas buang menggunakan impaksi dan gravitasi.

*Mist eliminator* menghilangkan antara 90- 99% *droplet* dari aliran gas buangan. Ada dua desain dasar, *chevron* dan *mesh pad mist eliminator*. *Droplet* terkumpul pada *chevron* atau *mesh*. Bila *droplet* cukup besar, *droplet* tersebut jatuh karena gravitasi. *Mesh pad mist eliminator* dapat terisumbat oleh partikel, oleh karena itu, desain *chevron* lebih sering diterapkan. *Pressure drop* pada *mist eliminator* rendah yaitu, 0,5 - 1,0 inci kolom air. Semua *mist eliminator* memerlukan pencucian periodik untuk menghilangkan penumpukan PM.

Umumnya pada sistem *venturi*, arah aliran adalah ke bawah. Setelah melewati *venturi*, alirannya berubah horisontal. Pembelokan arus dengan kecepatan tinggi mengakibatkan penurunan tekanan gas buangan dan abrasi akibat gesekan. Untuk meminimalkan efek ini, banyak desain *venturi* menggunakan *flooded elbow* yaitu, siku dengan genangan air. Cairan di saluran siku menurunkan gesekan dan mengumpulkan *droplet* berat dalam aliran gas buangan.

#### 2.9.5 Sistem Pengumpul Limbah Cair dan Pembuangan

Cairan *scrubber* yang telah digunakan dikuras dari dasar ruang pengumpul ke tangki resirkulasi. Sebagian cairan dikeluarkan dari sistem untuk membatasi konsentrasi padatan 20 - 30%. Efluen dari sistem dalam bentuk lumpur dengan kandungan padatan tinggi dan pada beberapa aplikasi, mungkin mengandung bahan berbahaya. Efluen yang tidak berbahaya dapat diolah dalam sistem air limbah yang ada atau oleh pihak ketiga. Cairan tersebut dipisahkan dari limbah padat, kemudian air limbahnya digunakan kembali atau dibuang. Sisa padatan atau lumpur ditimbun jika tidak



beracun. Gas buang yang mengandung PM berbahaya memerlukan pengolahan dan/atau pembuangan limbah berbahaya. Biaya tahunan untuk pembuangan limbah berbahaya bergantung dari laju alir air limbah, kandungan padatan tersuspensi, dan sifat berbahaya limbah (mudah terbakar, beracun, korosif, dll.). Biaya pembuangan meliputi biaya analisis laboratorium, biaya transportasi, dan biaya perawatan, pembuangan akhir, atau metode pembuangan lainnya. Karena tingginya biaya pembuangan, biaya ini tidak termasuk dalam biaya tahunan.

#### **2.9.6 Peralatan Bantu**

ID fan umumnya dibutuhkan untuk menambakan tekanan yang hilang dalam sistem *venturi* energi rendah. ID fan sedikit meningkatkan *capital cost* dari sistem *venturi* namun sangat meningkatkan biaya O&M karena penggunaan daya listrik dan perawatan. Masukan daya untuk fan berkisar dari 3 - 12 hp/1000 cfm. ID fan dapat ditempatkan di bagian hulu atau hilir *venturi wet scrubber*. Penempatan fan tergantung pada karakteristik limbah gas. Misalnya, aplikasi dengan beban partikulat tinggi fan ditempatkan di hilir. Untuk mengurangi korosi, fan dapat dibuat dari *stainless steel* atau dilapisi dengan bahan khusus.

Aliran gas dengan suhu tinggi menguapkan sebagian besar cairan *scrubber*, menyebabkan penurunan jumlah *droplet* yang dihasilkan oleh *venturi*. Oleh karena itu, gas sebelum memasuki *venturi* arus didinginkan, atau menyemprotkan air dengan volume yang besar ke *venturi*. Gas dapat didinginkan dengan *quencher*, yang menyemprotkan air ke aliran gas. Saat air menguap, suhu aliran gas menurun. *Quencher* sedikit meningkatkan *capital* dan O&M *cost* sistem.

Sistem *venturi* mungkin memerlukan peralatan tambahan untuk fan dan *quencher*. Sistem pengumpulan PM seperti *hood* mungkin diperlukan untuk mengumpulkan gas buang dari sumbernya. Perangkat pengumpul PM di hilir seperti *cyclone* mungkin diperlukan untuk menghilangkan PM yang besar dan mencegah abrasi komponen *venturi*. Cerobong diperlukan untuk mengeluarkan gas buang ke atmosfer dengan ketinggian yang ditentukan. Terakhir, perangkat pemanas mungkin diperlukan

untuk meningkatkan *plume buoyancy* untuk dispersi yang lebih baik dan mengurangi *plume visibility*.

## **2.10 Kriteria Desain *Wet Scrubber***

Kriteria desain yang digunakan untuk perencanaan ini meliputi:

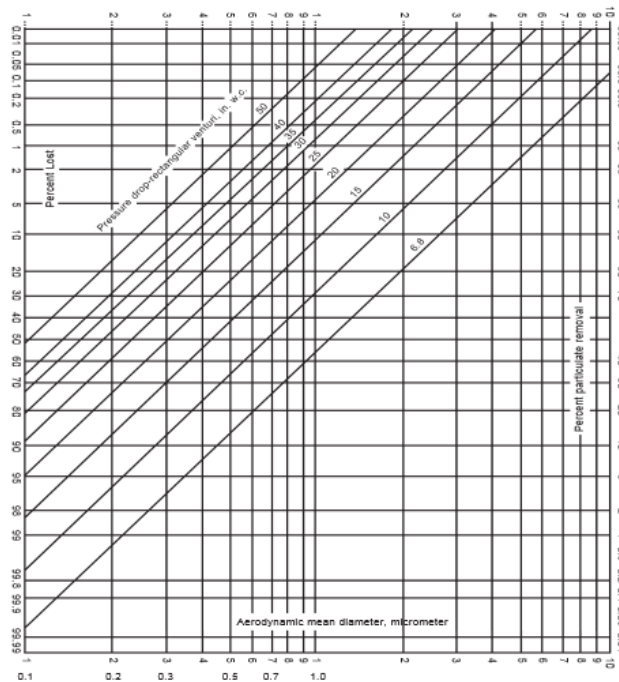
1. Ukuran partikel dan debit
2. *Flow rate* dari gas buang
3. Kecepatan gas dan *pressure drop*
4. Rasio liquid-to-gas (L/G)
5. Ukuran *droplet*
6. Waktu tinggal

### **2.10.1 Ukuran Partikel dan Debit**

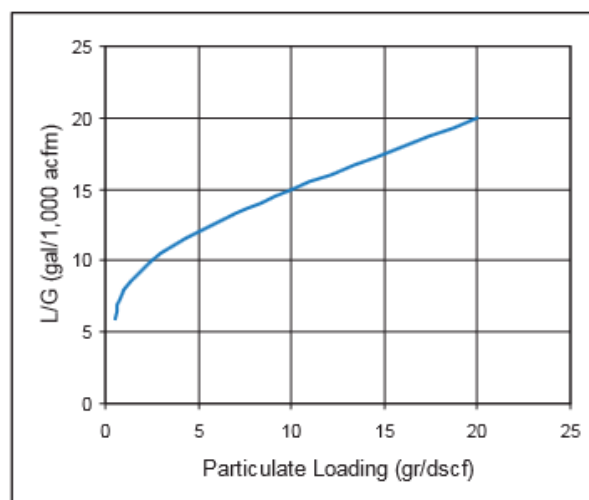
Kinerja *scrubber* cenderung sangat bergantung pada distribusi ukuran PM dalam aliran gas buang. Distribusi ukuran menentukan mekanisme penangkapan. Kebanyakan desain *wet scrubber* bergantung pada impaksi inersia untuk pengumpulan partikulat. Partikel yang lebih kecil dari 0,1  $\mu\text{m}$  ditangkap melalui mekanisme difusi. Gambar 2.5 menyajikan perkiraan efisiensi pengumpulan *venturi wet scrubber* sebagai fungsi ukuran partikel. Perhatikan bahwa efisiensi menurun secara eksponensial dengan ukuran partikel.

Beban PM adalah massa PM per satuan volume pada gas buang di inlet *scrubber*. Seiring kenaikan beban PM, rasio L/G harus meningkat untuk menjaga efisiensi pengumpulan yang sama. Gambar 2.6 menyajikan L/G sebagai fungsi pemuatan partikulat. Beban PM yang tinggi menghasilkan padatan yang tinggi pada cairan *scrubber*. Untuk menjaga kandungan padatan, volume cairan *scrubber* harus dikeluarkan dari sistem sebagai limbah dan sejumlah besar cairan *scrubber* baru harus ditambahkan ke sistem. Beban PM yang lebih tinggi meningkatkan biaya operasi sistem karena penggunaan pompa yang meningkat, penggunaan cairan *scrubber*, dan pembuangan limbah cair. Aplikasi dengan beban PM yang tinggi juga memerlukan perawatan yang lebih banyak, karena partikel dapat menyebabkan penyumbatan dan keausan seperti pada bagian *nozzle* dan fan.

Ukuran partikel tergantung pada jenis industrinya. Untuk industri metalurgi khususnya peleburan besi dan baja ukuran partikel berkisar pada 0,1 – 10  $\mu\text{m}$  (Mohiuddin, dkk., 2014).



**Gambar 2.5** Perkiraan Efisiensi Pengumpulan Partikel Kisaran Diameter 0,1-10  $\mu\text{m}$  pada *Venturi* dengan *Pressure Drop* 6,8-50 inci H<sub>2</sub>O



**Gambar 2.6** Rasio *Liquid-Gas* sebagai Fungsi Beban Partikel

### **2.10.2 Flow Rate dari Gas Buang, Temperatur dan Kelembaban**

Laju aliran gas buangan adalah parameter yang paling penting dalam *wet scrubber*. Semakin tinggi laju aliran gas buangan, semakin besar sistem *venturi* dan volume cairan *scrubber* yang dibutuhkan untuk menangani limbah gas. *Wet scrubber* beroperasi pada laju aliran gas yang lebih rendah dari pada *baghouse* atau ESP karena adanya injeksi cairan. *Venturi* energi rendah dapat mengakomodasi laju aliran udara hingga 95 m/s (300.000 acfm). Sistem *venturi* jet umumnya terbatas pada kira-kira 3 m/s (10.000 acfm) dan sistem *venturi multiple throat* dan energi tinggi dibatasi sekitar 47 m/s (150.000 acfm).

Suhu gas buang dan kelembaban juga mempengaruhi desain *venturi*. Saat udara melewati *wet scrubber*, air menguap, yang meningkatkan kelembaban dan mendinginkan aliran gas. Jumlah penguapan ditentukan oleh suhu masuk dan kelembaban. Tingkat penguapan yang tinggi akan meningkatkan rasio L/G yang dibutuhkan oleh sistem. Untuk aplikasi PM, *wet scrubber* umumnya terbatas pada kisaran suhu (50 - 700° F) karena penguapan. *Quencher* mungkin dibutuhkan untuk aplikasi suhu yang lebih tinggi. Temperatur tinggi mempengaruhi material yang digunakan untuk pembuatan komponen *scrubber*.

### **2.10.3 Kecepatan Gas dan Pressure Drop**

Meningkatnya kecepatan relatif antara gas dan *droplet* meningkatkan momentum partikulat, sehingga partikel yang lebih kecil dikumpulkan dengan impaksi. Kecepatan relatif dapat ditingkatkan dengan mempersempit *throat*, menyuntikkan cairan *scrubber* berlawanan dengan arah aliran gas, atau menyembrotkan cairan ke dalam *throat*. Namun, kecepatan relatif meningkat umumnya meningkatkan *pressure drop*, kebutuhan energi, dan biaya operasi untuk *scrubber*. *Venturi* energi tinggi meningkatkan kecepatan gas dengan menggunakan ID fan yang dipasang di hulu *venturi*. Sistem ini membutuhkan biaya operasi jauh lebih tinggi daripada *venturi* energi rendah.

Semakin kecil area penampang *throat*, semakin besar pula kenaikan kecepatan gas yang didapat. Kecepatan gas tertinggi terjadi pada area tersempit pada *throat*, umumnya berkisar antara 45 -150 m /s (150 - 500 ft/s). Kehilangan tekanan yang dihasilkan

dari aliran gas di *venturi* berada pada kisaran 10 – 80 inci kolom air. Secara umum, meningkatkan *pressure drop* di atas 45 inci kolom air tidak secara signifikan meningkatkan efisiensi penghilangan untuk desain *venturi* konvensional. Desain *venturi* mengoptimalkan luas penampang *throat* untuk menghasilkan kecepatan gas yang tinggi sekaligus meminimalkan *pressure drop*. Selain itu, bagian divergen *venturi* dirancang untuk memulihkan tekanan. Bagian divergen dirancang untuk mengurangi kecepatan gas buang antara 30 - 15 m/s (100 - 50 ft/s). Pada kecepatan ini, kehilangan turbulen diminimalkan dan jumlah pemulihan energi terbesar tercapai.

#### 2.10.4 Rasio Liquid-to-Gas

Rasio *liquid-to-gas* (L/G) adalah volume cairan yang disuntikkan per volume gas buang yang diolah. Secara umum, rasio L/G yang lebih tinggi meningkatkan efisiensi pengumpulan karena kerapatan *droplet* di penampang melintang *venturi* lebih tinggi. Laju aliran optimum cairan antara 7 – 10 gal/1000ft<sup>3</sup>. Rasio L/G dalam kisaran ini menghasilkan efisiensi pengumpulan yang cukup konstan dengan adanya *pressure drop* konstan. Rasio L/G lebih besar dari 10 gal/1000ft<sup>3</sup> tidak memperbaiki kinerja *scrubber* secara signifikan. Sementara meningkatkan rasio L/G meningkatkan efisiensi pengumpulan, biaya operasi juga meningkat karena penggunaan cairan dan pompa yang lebih besar.

#### 2.10.5 Ukuran Droplet

Terdapat ukuran *droplet* optimum untuk memaksimalkan pengumpulan PM. *Droplet* yang lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar dengan perbandingan volume, karenanya, mereka menangkap lebih banyak partikel per volume cairan yang disuntikkan. Namun, jika ukuran *droplet* menjadi terlalu kecil, momentum gas buangan yang diberikan ke *droplet* menurunkan kecepatan relatif antara *droplet* dan partikel. Kecepatan relatif rendah menghasilkan efisiensi pengumpulan yang lebih rendah. *Wet scrubber* mengontrol ukuran *droplet* dengan menggunakan beberapa teknik. Pada *scrubber* yang menggunakan *preformed droplet*, seperti *spray tower*, ukuran *droplet* ditentukan oleh jenis *nozzle* dan kondisi pengoperasian

sistem. Pada *dynamic scrubber*, kecepatan rotor dan L/G mengontrol ukuran *droplet*. Pada *venturi scrubber*, ukuran tetesan dikendalikan oleh L/G dan kecepatan gas di *throat*.

#### **2.10.6 Waktu Tinggal**

Menambah panjang *throat* dan bagian divergen, meningkatkan pula waktu kontak antara cairan dan PM tersuspensi dalam gas buang. Misalnya, *venturi* dengan panjang *throat* 1 kaki dan kecepatan sekitar 450 ft/s memiliki waktu kontak 1/450 detik. Ini adalah waktu minimal untuk pencampuran dan kontak antara cairan dan limbah gas. Untuk *throat* silinder, panjang tenggorokan sampai rasio diameter *throat* minimum adalah 3 : 1. Untuk sistem energi tinggi, disarankan agar panjang bagian divergen *throat* paling sedikit 4 kali lebar *throat* agar memiliki waktu kontak yang cukup.

### **2.11 Desain Sistem**

#### **2.11.1 Beban dan Distribusi Partikel**

Desain dan kinerja *scrubber* sangat bergantung pada sifat partikel dalam aliran gas buangan. Seperti dibahas sebelumnya, sifat yang paling penting adalah distribusi ukuran dan beban partikel. Distribusi dan beban partikel sumber spesifik menentukan alat pengumpulan PM yang paling efisien.

Karena partikel memiliki berbagai bentuk dan densitas, ukuran partikel biasanya dinyatakan sebagai diameter aerodinamis. Diameter aerodinamis partikel adalah diameter bidang dengan densitas air yang mengendap dalam udara pada tingkat yang sama dengan partikel yang bersangkutan. Distribusi ukuran biasanya diukur dengan menggunakan *cascade impactor*, yang memisahkan partikel berdasarkan diameter aerodinamis pada lempeng. Massa partikel pada setiap lempeng *impactor* diukur. Gambar 2.7 menyajikan tipikal distribusi ukuran partikel PM, yaitu kumpulan partikel kumulatif dengan ukuran partikel. PM dari sumber industri, umumnya memiliki distribusi log-normal.

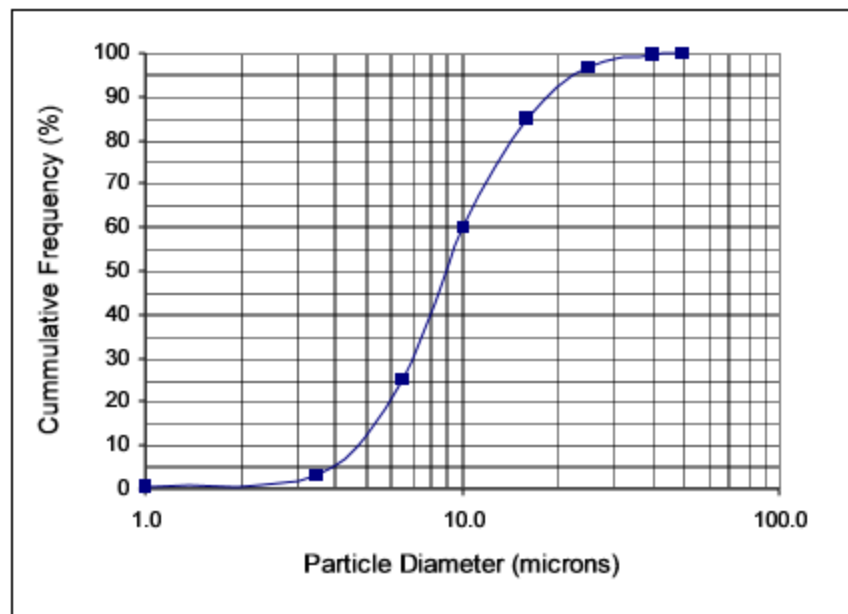
Diameter rata-rata geometris adalah diameter aerodinamis persentil ke-50 (juga disebut sebagai *mass median particle diameter*). Menurut definisi, standar deviasi dari distribusi log-

normal adalah rasio dari persentil ke-84 sampai ukuran partikel persentil ke-50:

$$\sigma = \frac{d_{84}}{d_{50}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana,

- $\sigma$  = standar deviasi
- $d_{50}$  = fraksi massa persentil ke-50
- $d_{84}$  = fraksi massa persentil ke-84



**Gambar 2.7** Distribusi Ukuran Partikel untuk Sumber PM

### 2.11.2 Efisiensi Pengumpulan

Efisiensi pengumpulan adalah jumlah PM yang dihilangkan dari aliran gas oleh *wet scrubber*. Efisiensi ini dapat dinyatakan dengan beberapa cara termasuk efisiensi *droplet*, efisiensi *scrubber* berdasarkan massa, atau efisiensi *scrubber* berdasarkan ukuran partikel. Masing-masing efisiensi ini didefinisikan di bawah ini.

Efisiensi pengumpulan *droplet*,  $\eta_{\text{droplet}}$  didefinisikan sebagai daerah yang tersapu partikel aerosol dibagi dengan luas penampang *droplet*.

$$\eta = \frac{\text{area yang tersapu partikel aerosol}}{\text{luas penampang } \textit{droplet}} \dots \dots \dots (2.2)$$

Efisiensi keseluruhan dari scrubber biasanya berhubungan dengan  $\eta_{\text{droplet}}$  dengan persamaan eksponensial empiris. Namun, sebagian besar parameter dalam persamaan umumnya tidak tersedia di tingkat studi. Oleh karena itu, bab ini tidak menyajikan metode penentuan efisiensi ini.

Efisiensi pengumpulan berbasis massa adalah sebagai berikut:

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_i - \dot{m}_o}{\dot{m}_i} = \frac{l_i - l_o}{l_i} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana,

- $\eta_m$  = efisiensi pengumpulan
- $\dot{m}_{i,o}$  = total *flow rate massa* di inlet, outlet
- $l_{i,o}$  = beban partikel di inlet, outlet

Efisiensi pengumpulan sebagai fungsi distribusi ukuran partikel adalah efisiensi pengumpulan kumulatif untuk setiap rentang ukuran partikel.

$$\eta_d = \sum_0^j \eta_j m_j \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana,

- $\eta_d$  = efisiensi pengumpulan keseluruhan
- $\eta_j$  = efisiensi fraksional untuk diameter partikel ke-j
- $m_j$  = fraksi massa diameter partikel ke-j

Fraksi massa didefinisikan oleh:

$$m_j = \frac{\text{massa partikel ke-j}}{\text{total massa}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Efisiensi pengumpulan berbasis massa umumnya lebih tinggi daripada efisiensi pengumpulan berdasarkan partikel. Ini karena partikel ukuran lebih besar, yang umumnya lebih masif, cenderung dikumpulkan pada efisiensi yang lebih tinggi daripada partikel diameter yang lebih kecil. Oleh karena itu, lebih umum untuk menentukan efisiensi dengan ukuran partikel daripada massa.

$$P_{td} = 1 - \eta_d \dots\dots\dots (2.6)$$



Dimana,

$P_{td}$  = partikel yg berhasil lolos

$\eta_d$  = efisiensi pengumpulan keseluruhan

Persamaan untuk desain alat menggunakan *cut* diameter yaitu, diameter efisiensi pengumpulan scrubber sebesar 50%. *Cut* diameter adalah karakteristik perangkat kontrol dan kondisi operasi, bukan kisaran ukuran partikel. Hal ini ditentukan secara eksperimental dengan menggunakan efisiensi pengumpulan partikel dan data distribusi ukuran partikel yang dikumpulkan untuk perangkat tertentu dan rangkaian kondisi operasi.

### 2.11.3 Sifat Gas Buang

Sifat fisik dan kimia dari gas buangan umumnya diberikan kepada *vendor* untuk mengukur sistem *scrubber* dengan benar dan memilih bahan fabrikasi yang sesuai. Sifat ini memiliki dampak langsung pada *capital* dan *annual cost* yang terkait dengan desain *scrubber*. Perancang memerlukan informasi tentang kondisi di inlet dan outlet termasuk:

$Q$  = laju alir volumetrik,

$V$  = volume,

$T$  = temperature,

$P$  = tekanan,

$\theta_{air}$  = kadar air fraksional.

Sifat gas buang diukur pada inlet menuju scrubber. Sifat gas buangan pada outlet berubah sebagai hasil laju penguapan cairan *scrubber*. Ketika gas buang panas melewati *scrubber*, sebagian air dalam cairan *scrubber* menguap. Suhu gas buang menurun, kadar air dan kelembaban meningkat, dan volumenya menurun. Untuk tujuan desain, kondisi gas buang pada outlet *scrubber* diasumsikan berada pada titik jenuh.

Penguapan melalui *scrubber* umumnya dimodelkan sebagai proses pendinginan evaporatif langsung (juga disebut sebagai proses penjumlahan adiabatik). Pada proses ini, udara yang tidak jenuh (kering) didinginkan dengan mentransfer panas pada uap air sebagai panas laten. Jumlah total energi panas yang terkandung di udara (entalpi) tetap konstan. Selain itu, sistem diasumsikan menghemat massa dan gas buangan diasumsikan berperilaku sebagai gas ideal. Dengan asumsi ini, laju alir massa

udara kering melalui sistem tetap konstan dan perbedaan antara uap air inlet dan outlet adalah massa yang diuapkan dalam *scrubber*. Kandungan kelembaban mengacu pada volume uap air dalam volume gas tertentu. Kandungan kelembaban diberikan dengan persamaan:

$$\theta_{\text{air}} = \frac{V_{wv}}{V_a + V_{wv}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana,

- $\theta_{\text{air}}$  = kadar air fraksional
- $V_{wv}$  = volume uap air
- $V_a$  = volume udara

Rasio kelembaban, atau kelembaban absolut adalah rasio massa udara kering terhadap uap air:

$$\omega = \frac{m_{wv}}{m_a} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana,

- $\omega$  = rasio kelembaban
- $m_{wv}$  = massa uap air
- $m_a$  = massa udara

Berbeda dari kelembaban relatif, yaitu rasio tekanan parsial uap air pada kondisi saat ini dan pada saturasi untuk suhu tertentu. Hubungan antara kadar air,  $\theta_{\text{air}}$ , dan rasio kelembaban,  $\omega$ , untuk gas ideal diberikan sebagai:

$$\theta_{\text{air}} = \frac{\frac{\omega}{MW_a}}{\left(\frac{1}{MW_{wv}} + \frac{\omega}{MW_a}\right)} \approx \omega \frac{MW_{wv}}{MW_a} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana,

- $MW_{wv}$  = berat molekul uap air
- $MW_a$  = berat molekul udara

Untuk menggunakan diagram psikometrik, sifat gas buangan harus diketahui pada kondisi standar (atau kondisi grafik, jika berbeda dari standar). Sifat-sifatnya ditentukan untuk kondisi standar dengan menggunakan Hukum Gas Ideal:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana suhu berada dalam satuan derajat Kelvin. Dengan mengasumsikan tekanan konstan, volume gas buang pada suhu standar dapat dihitung sebagai:

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} \text{ atau } Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana,

$Q_2$  = laju alir volume gas buang (uap air dan udara) pada kondisi standar

Hubungan antara massa dan volume gas ideal dapat dihitung dari volumenya pada suhu standar dan tekanan dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{m} = Q \frac{MW}{V_{mol}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana,

$\dot{m}$  = laju aliran massa

MW = berat molekul

$V_{mol}$  = volume satu mol udara  
= 22,4 lt/gr.mol

Kadar kelembaban (atau rasio kelembaban) digunakan untuk menghitung laju alir massa udara kering dan uap air pada saluran masuk.

$$\dot{m}_{wv(m)} = [Q_{m(in)} \times \theta_{air(in)}] \frac{MW_{wv}}{V_{mol}} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\dot{m}_a = [Q_{m(in)} (1 - \theta_{air(in)})] \frac{MW_{wv}}{V_{mol}} \dots\dots\dots(2.14)$$

#### 2.11.4 Psychrometric Chart

Gambar 2.8 adalah contoh grafik *psychrometric* pada kondisi atmosfir standar, 14,7 psi. *Dry-bulb temperature* adalah sumbu-x pada grafik. *Dry-bulb temperature* adalah suhu campuran gas buangan uap air dan udara, atau suhu yang diukur dengan termometer biasa. Sumbu-y pada grafik memiliki skala untuk rasio

kelembaban dan kelembaban relatif. Sumbu-y ke paling kanan pada grafik adalah kurva saturasi, mewakili kelembaban relatif 100%. Garis yang miring ke kiri atas adalah garis *wet-bulb temperature* konstan, volume tertentu, dan entalpi. Volume spesifik dari campuran uap air-udara, atau volume lembab, adalah volume campuran per satuan massa udara kering.

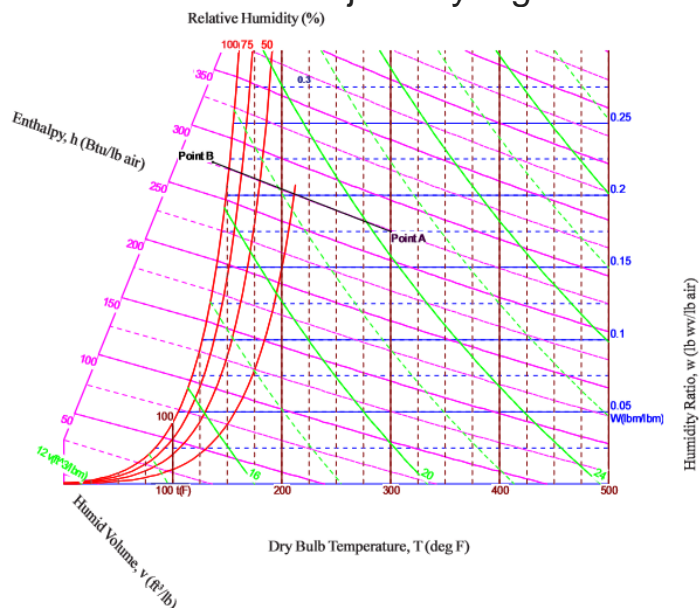
Gunakan grafik untuk menentukan kondisi outlet pada saturasi. Pertama, menentukan titik pada grafik berdasarkan rasio *dry-bulb temperature* dan kelembaban. Ikuti garis yang sesuai dari entalpi konstan (garis saturasi adiabatik) ke kurva saturasi di sebelah kiri. Inilah lokasi untuk membaca kondisi pada outlet gas buang. Ini adalah titik di mana air maksimum dari *scrubber* telah menguap menjadi gas buang. Perhatikan bahwa massa udara kering dipertahankan selama proses berlangsung,  $m_{a(in)} = m_{a(out)}$ .

Kecepatan aliran volumetrik gas buang pada outlet *scrubber* sekarang dapat ditentukan. Dengan menggunakan laju alir massa udara kering dan volume lembab,  $v$ , terbaca dari grafik, volume udara jenuh per satuan massa udara kering, yang diperoleh dari grafik, laju alir volumetrik adalah:

$$Q_{m(out)} = v \dot{m}_a \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana,

$v$  = volume udara jenuh yang lembab



**Gambar 2.8** Grafik *Psychrometric*

Rasio kelembaban outlet dapat digunakan untuk menghitung massa uap air pada gas buangan di outlet scrubber:

$$\dot{m}_{wv(out)} = \omega_{(out)} \dot{m}_a \dots \dots \dots (2.16)$$

Air tambahan harus dimasukkan ke sistem *scrubber* untuk mengganti air yang hilang akibat penguapan. Dengan menentukan perbedaan antara kelembaban inlet dan outlet aliran gas limbah, volume air yang diuapkan dapat dihitung. Massa air yang diuapkan melalui scrubber adalah:

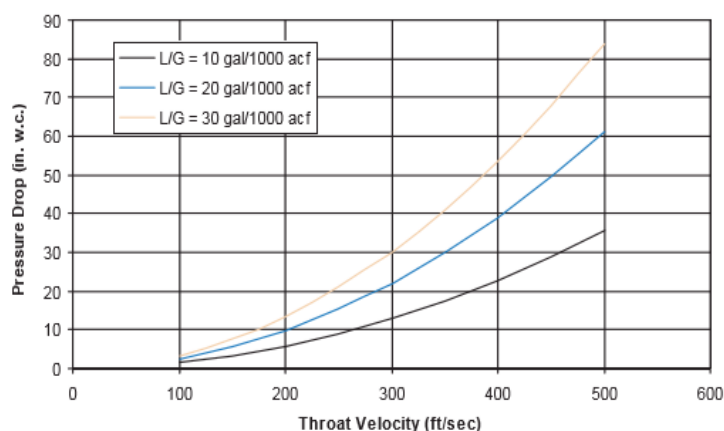
$$\dot{m}_{wv(evap)} = \dot{m}_{wv(out)} - \dot{m}_{wv(in)} \dots \dots \dots (2.17)$$

Tingkat volume air pengganti adalah:

$$Q_{wv(evap)} = \frac{\dot{m}_{wv(evap)}}{\rho_{air}} \dots \dots \dots (2.18)$$

## 2.12 Desain Scrubber

Secara umum, produsen *wet scrubber* menjamin efisiensi pengumpulan untuk desain tertentu. Efisiensi pengumpulan ini bergantung pada rasio cairan-gas, kecepatan gas di *venturi* dan *pressure drop*. Rasio L/G dan *pressure drop* mempengaruhi biaya O&M sedangkan kecepatan gas *venturi* mempengaruhi biaya modal. Sejumlah metode untuk memperkirakan desain parameter *venturi* telah dikembangkan oleh berbagai penelitian. Bagian ini menyajikan empat metode yang paling umum digunakan oleh desainer.



**Gambar 2.9** Hubungan antara *Pressure Drop*, Kecepatan di *Throat* dan L/G

### 2.12.1 Memperkirakan *Pressure Drop*

Sebagian besar persamaan *pressure drop* untuk *venturi scrubber* adalah:

$$\Delta P = k v^2 \rho_g (L/G) \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana,

$\Delta P$  = *pressure drop* di penampang *venturi*

$v$  = kecepatan di *throat*

$\rho_g$  = kerapatan gas

$L/G$  = rasio cairan-gas

$k$  = factor korelasi untuk desain *scrubber* tertentu

Salah satu persamaan yang lebih banyak diterima untuk memperkirakan *pressure drop* pada *venturi scrubber* (Calvert, 1977). *Pressure drop* diberikan sebagai berikut:

$$\Delta P = 5,4 \times 10^{-4} v^2 \rho_g (L/G)$$

Dimana,

$\Delta P$  = *pressure drop* di penampang *venturi* dalam inci H<sub>2</sub>O

$v$  = kecepatan di *throat* dalam ft/s

$\rho_g$  = kerapatan aliran gas jenuh dalam lb/ft<sup>3</sup>

$L/G$  = rasio cairan-gas dalam gal/1000 ft<sup>3</sup>

Persamaan Calvert memprediksi *pressure drop* cukup baik pada rasio cairan-gas yang moderat. Pada rasio antara 3 -10 gal/1000 ft<sup>3</sup>, persamaan tersebut ditemukan berkinerja baik, namun pada rasio di atas 12 gal/1000 ft<sup>3</sup>, persamaan tersebut menghasilkan *pressure drop* 80% lebih dari perkiraan.

Model untuk *pressure drop* yang diterbitkan oleh Hesketh juga banyak digunakan. Model ini didasarkan pada korelasi data eksperimen yang diperoleh dari banyak *venturi scrubber* yang berbeda. Persamaan Hesketh untuk *pressure drop* adalah:

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0,133}}{507} \left( 0,56 + 0,125 \frac{L}{G} + 0,0023 \left( \frac{L}{G} \right)^2 \right) \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana,

$\Delta P_{H_2O}$  = *pressure drop* di penampang *venturi* dalam inci  
 $v$  = kecepatan di *throat* dalam ft/s  
 $\rho_g$  = kerapatan aliran gas jenuh dalam lb/ft<sup>3</sup>  
 $A$  = daerah penampang *throat* dalam ft<sup>2</sup>  
 $L/G$  = rasio cairan-gas dalam gal/1000 ft<sup>3</sup>  
 Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0,133} (L/G)^{0,78}}{1270} \dots\dots\dots(2.21)$$

Hesketh secara eksperimental menentukan hubungan antara *pressure drop* dan efisiensi pengumpulan. Berdasarkan data yang terkumpul, Hesketh menyimpulkan bahwa *venturi* pada dasarnya 100% efisien untuk partikel yang lebih besar dari 5  $\mu$ m. Dia mengembangkan korelasi antara *pressure drop* dan material lolos untuk ukuran partikel di bawah nilai di atas, dengan persamaan:

$$P_t = \frac{C_i}{C_o} = 3,47 \Delta P^{-1,43} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana,

$C_i$  dan  $C_o$  = konsentrasi partikel < 5  $\mu$ m di inlet dan outlet  
*venturi scrubber* berbasis massa

### 2.12.2 Teori Daya Kontak

Teori kontak didefinisikan sebagai energi yang dikeluarkan per satuan volume gas yang diolah. Teori ini dikembangkan oleh Lapple dan Kamack dan diperluas oleh Semrau. Teori ini menyatakan bahwa semua *scrubber* memberikan tingkat pengumpulan partikel yang sama pada tingkat konsumsi daya yang sama, terlepas dari bagaimana daya diperoleh, baik dari *pressure drop* fase gas, atomisasi fase cair, atau alat mekanis. Hal ini sering disebut sebagai *Equivalent Energy Theory*.

Teori tersebut dijabarkan sebagai berikut:

$$P_T = P_G + P_L + P_{mech} \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana,

$P_T$  = total daya kontak

$P_G$  = daya karena *pressure drop* gas

$P_L$  = daya karena atomisasi cairan *scrubber*

$P_{mech}$  = daya karena alat mekanis untuk meningkatkan kontak contoh: rotor

Daya kontak ditentukan dari hilangnya gesekan di bagian *scrubber* yang dibasahi. Kehilangan tekanan akibat aliran gas diabaikan.

$P_G$  adalah daya kontak dari input energi aliran gas, yang umumnya dinyatakan sebagai hp/1000 acfm. Bagi kebanyakan *wet scrubber*,  $P_G$  mendominasi total persamaan daya kontak. Diperkirakan dari *pressure drop* yang diukur di *scrubber* sebagai:

$$P_G = 0,157 \Delta P \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana,

$\Delta P$  = *pressure drop* di *venturi* dalam inci H<sub>2</sub>O

Daya kontak dari input energi arus cair,  $P_L$ , juga dinyatakan sebagai hp/1000 acfm. Hal ini didasarkan pada rasio cairan terhadap gas dan dinyatakan oleh:

$$P_L = 0,583 (L/G) \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana,

$P_L$  = tekanan pada inlet dalam psi

$L/G$  = rasio cairan terhadap gas dalam gal/ft<sup>3</sup>

**Tabel 2.4** Parameter Operasi untuk *Wet Scrubber*

<b>Tipe Scrubber</b>	<b>Pressure Drop (in. H<sub>2</sub>O)</b>	<b>Rasio L/G (gal/1000 acf)</b>	<b>Tekanan Cairan (psig)</b>	<b>Kecepatan Gas (ft/s)</b>	<b>Cut Diameter (μm)</b>
<i>Spray Tower</i>	0,5 – 3	0,5 – 20	10 – 400	10	2 – 8
<i>Cyclonic</i>	2 – 10	2 – 10	10 – 400	105 – 140	2 – 3
<i>Venturi</i>	10 – 150	2 – 20	0,5 – 2	90 – 400	0,2



Daya kontak berkorelasi dengan efisiensi pengumpulan scrubber,  $\eta$ . Korelasi ini sering dinyatakan sebagai jumlah "unit transfer", sebuah bilangan tak berdimensi yang didefinisikan oleh persamaan:

$$N_t = \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) \dots\dots\dots(2.26)$$

Jumlah unit transfer untuk daya kontak yang diberikan tergantung pada jenis *scrubber* dan karakteristik partikel. Untuk jenis *scrubber* dan partikulat tertentu, hubungan antara unit transfer dan daya kontak adalah:

$$N_t = \alpha P_T^\beta \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien empiris yang merupakan karakteristik tipe *scrubber* dan partikulat yang dikumpulkan. Tabel 2.2 menyajikan koefisien untuk berbagai jenis *scrubber*. *Pressure drop* yang terkait dengan efisiensi pengumpulan tersebut kemudian dapat dihitung.

**Tabel 2.5** Parameter Korelasi Daya Kontak

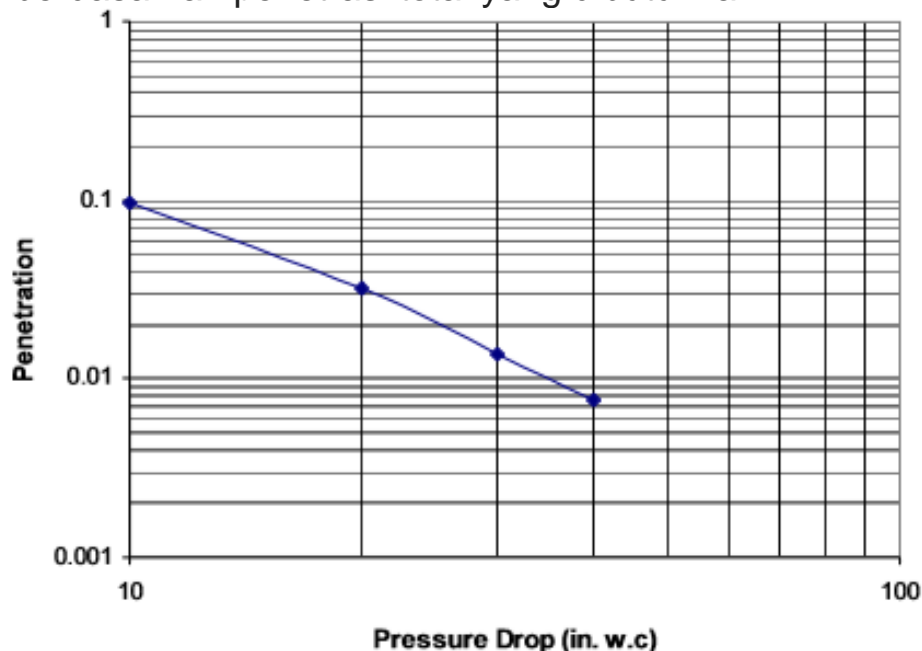
<b>Jenis Aerosol</b>	<b>Tipe Scrubber</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
Debu <i>Lime Klin</i>	<i>Venturi dan Cyclonic Spray</i>	1,47	1,05
Debu <i>Prewashed Lime Klin</i>	<i>Venturi, Pipe Line, dan Cyclonic Spray</i>	0,915	1,05
Debu <i>Talc</i>	<i>Venturi</i>	2,97	0,362
Debu <i>Talc</i>	<i>Orifice dan Pipe Line</i>	2,7	0,362
Kabut Asam Fosfat	<i>Venturi</i>	1,33	0,647
Debu <i>Foundry Cupola</i>	<i>Venturi</i>	1,35	0,621
<i>Open Hearth Steel Furnace</i>	<i>Venturi</i>	1,26	0,569
Debu <i>Talc</i>	<i>Cyclone</i>	1,16	0,655
<i>Ferrosilicon Furnace</i>	<i>Venturi dan Cyclonic Spray</i>	0,87	0,459
<i>Odorous Mist</i>	<i>Venturi</i>	0,363	1,41

### 2.12.3 Kurva Kinerja

Kurva kinerja adalah efisiensi pengumpulan *scrubber* sebagai fungsi dari diameter partikel pada *pressure drop* yang ditentukan. Kurva spesifik untuk desain *venturi* tertentu. Secara umum, beberapa kurva disajikan untuk berbagai *pressure drop*. Kurva kinerja harus diperoleh dari vendor. Gambar 2.6 adalah contoh kurva kinerja untuk *venturi* persegi panjang.

Efisiensi pengumpulan keseluruhan harus dihitung untuk mendapatkan penetrasi total semua PM. Efisiensi pengumpulan keseluruhan adalah jumlah efisiensi pengumpulan di setiap rentang ukuran partikel. Efisiensi pengumpulan fraksional adalah fraksi massa dari kisaran ukuran dikalikan dengan efisiensi pengumpulan untuk rentang tersebut. Menjumlahkan nilai-nilai ini memberikan efisiensi pengumpulan kumulatif,  $\eta_d$ , pada *pressure drop* tertentu. Kemudian total penetrasi,  $P_t$ , dapat dihitung.

Karena setiap *pressure drop* memiliki kurva sendiri, penetrasi total pada beberapa *pressure drop* harus dihitung dengan menggunakan prosedur di atas. Kemudian, penetrasi total,  $P_{td}$ , diplot untuk setiap *pressure drop* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Desain *pressure drop* di *scrubber* dibaca dari grafik berdasarkan penetrasi total yang dibutuhkan.



**Gambar 2.10** Penetrasi dan *Pressure Drop* Ditentukan dengan Kurva Kinerja

#### 2.12.4 Metode *Culvert Cut Diameter*

Metode ini mengasumsikan bahwa parameter perancangan yang paling signifikan untuk *wet scrubber* adalah diameter partikel yang dikumpulkan pada efisiensi 50% atau *cut diameter*. Dengan menggunakan pendekatan ini diperlukan distribusi ukuran partikel log-normal.

Penetrasi *scrubber* dimodelkan sebagai fungsi eksponensial dari diameter aerodinamis yang diketahui dari:

$$Pt_j = e^{(-A d_j^B)} \dots\dots\dots(2.28)$$

Dimana,

- $Pt_j$  = penetrasi dari partikel diameter ke-j
- $d_j$  = diameter dari ukuran partikel ke-j
- $A, B$  = konstanta empiris

B adalah konstanta spesifik dari *scrubber*. B sama dengan 2,0 untuk *venturi*.

Rumus penetrasi keseluruhan adalah:

$$Pt_d = \int Pt_j m_j \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana,

- $Pt_d$  = penetrasi keseluruhan
- $Pt_j$  = penetrasi dari partikel diameter ke-j
- $m_j$  = fraksi massa dari partikel diameter ke-j

Pendekatan *Calvert Cut Diameter* menggunakan rasio pemotongan yang didefinisikan sebagai:

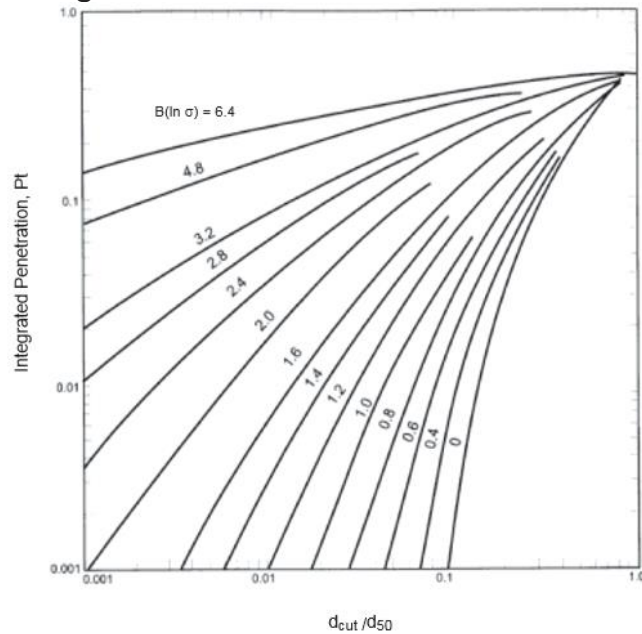
$$cut\ ratio = \frac{d_{cut}}{d_{50}} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana,

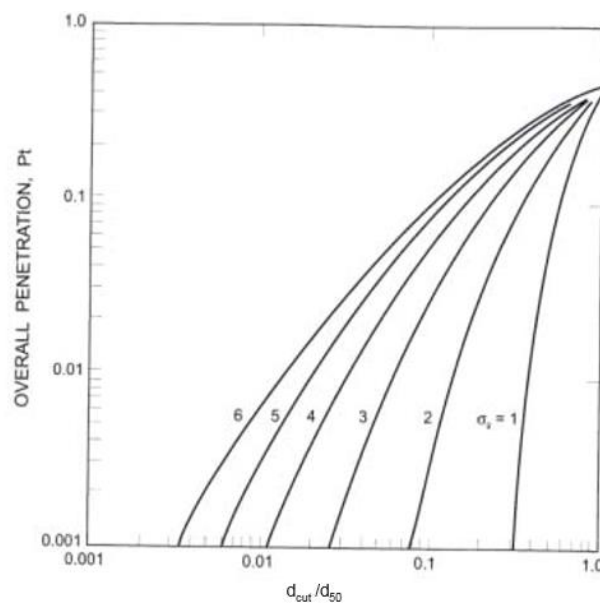
- $d_{cut}$  = diameter yang dibutuhkan

Persyaratan desain untuk keseluruhan penetrasi dan standar deviasi distribusi menentukan *cut diameter*. *Cut diameter* dapat diperoleh dari grafis dengan menggunakan kurva kinerja *cut diameter* khusus vendor. Gambar 2.11 dan Gambar 2.12 dari

panduan peralatan yang diterbitkan oleh *Calvert Environmental Equipment, Inc.*, menyajikan penetrasi sebagai fungsi dari standar deviasi distribusi dan rasio potong. Perhatikan bahwa Gambar 2.12 sama dengan Gambar 2.11 namun mengasumsikan  $B = 2.0$ . Rasio pemotongan yang dibutuhkan dibaca dari kurva dan digunakan untuk menghitung *cut diameter*.



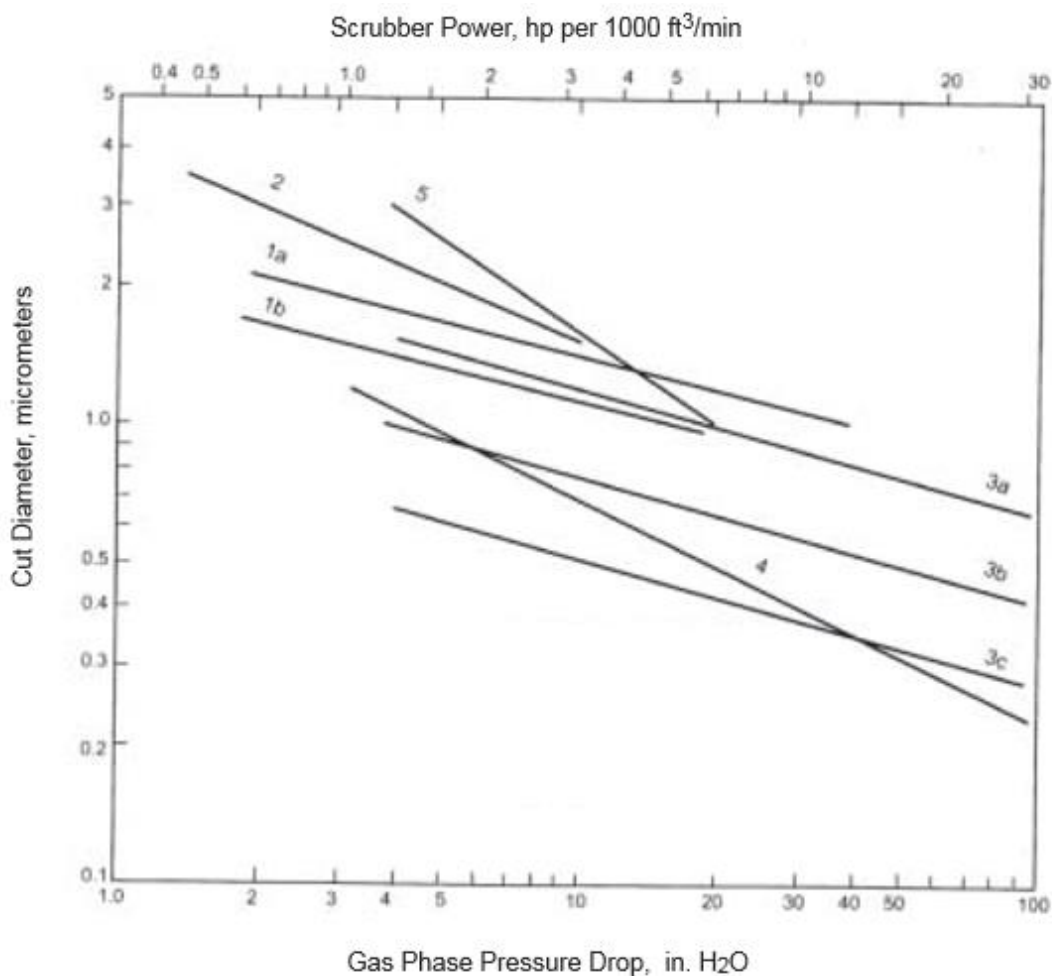
**Gambar 2.11** *Cut Diameter* sebagai Fungsi *Cut Ratio* dan Standar Deviasi Distribusi Ukuran Partikel



**Gambar 2.12** *Cut Diameter* sebagai Fungsi *Cut Ratio* dan Standar Deviasi Distribusi Ukuran Partikel,  $B = 2,0$

Setelah *cut diameter* diketahui, *pressure drop* dan daya *scrubber* dapat dibaca dari kurva kinerja spesifik vendor lainnya. Contoh dari jenis kurva kinerja ini ditunjukkan oleh Gambar 2.13. Menunjukkan *pressure drop* dan daya untuk beberapa jenis *scrubber*. Kebutuhan daya dari angka ini mengasumsikan efisiensi fan sebesar 50%. Untuk mendapatkan kebutuhan daya pada efisiensi lainnya, gunakan persamaan berikut ini:

$$daya_{\eta_2} = daya_{\eta_1} \frac{\eta_1}{\eta_2} \dots\dots\dots(2.31)$$



**Gambar 2.13** Daya *Scrubber* dan *Pressure Drop* sebagai Fungsi dari *Cut Diameter*, *Venturi* Ditunjukkan oleh Garis No. 4

### 2.12.5 Kecepatan *Scrubber* dan Area Penampang

Salah satu dari empat pendekatan yang dibahas sebelumnya dapat digunakan untuk memperkirakan *pressure drop*

untuk menentukan kecepatan gas yang dibutuhkan di *throat venturi*. Kecepatan pada *throat* bergantung pada:

1. Campuran cair-gas dan rasio L/G
2. Turbulensi
3. Distribusi campuran cairan-gas dan PM di *throat*
4. *Hydrolic losses* di *throat*

Kecepatan di *throat* dibatasi oleh kecepatan gas yang dapat diterima pada baguian hilir *scrubber* seperti *mist eliminator*.

Terdapat persamaan teoritis yang tersedia untuk menghitung kecepatan *throat*, namun kebanyakan produsen menentukan kecepatan *throat* secara eksperimental. Kecepatan *throat* dan luas penampang dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan Bernoulli yang dimodifikasi:

$$v_t = \frac{Q_m}{A_t} = C \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{sat}}} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana,

- |              |                                   |
|--------------|-----------------------------------|
| $v_t$        | = kecepatan di <i>throat</i>      |
| $Q_m$        | = laju aliran udara volumetrik    |
| $A_t$        | = area penampang <i>throat</i>    |
| $\rho_{sat}$ | = densitas gas pada keadaan jenuh |
| $C$          | = konstanta                       |

C adalah fungsi dari rasio L/G. Hubungan antara C dan L/G dikembangkan untuk *venturi* dengan bagian konvergen 30°, bagian divergen 10° - 12°, dan kerapatan gas 0,06 lb/ft³.

$$C = 1060 e^{(-0,279 L/G)} \dots\dots\dots(2.33)$$

Peningkatan densitas gas di atas 0,075 menyebabkan nilai C, dan  $v_t$ , meningkat dengan cepat karena meningkatnya hambatan gas.

Daerah penampang *throat* dihitung dari inlet *scrubber* dan kecepatan di *throat*.

$$A_t = A_i \frac{v_t}{v_i} \dots\dots\dots(2.34)$$

Dimana,

$A_t$  dan  $A_i$  = area dari *throat* dan inlet

Dari daerah penampang *throat*, dimensi *throat* dapat diperkirakan. Diameter *throat* dapat dihitung sebagai:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 A_t}{\pi}} \dots\dots\dots(2.35)$$

Panjang *throat* dan bagian divergen *venturi* dioptimalkan untuk pemulihan tekanan. Panjang tenggorokan umumnya 3 kali diameter *throat* (atau lebar) dan panjang bagian divergen 4 kali diameter *throat* (atau lebar).

$$l_t = 3 d_t \dots\dots\dots(2.36)$$

$$l_{div} = 4 d_t \dots\dots\dots(2.37)$$

Jalur aliran gas keluar dari *venturi* sering berbalik 90 ° sebelum memasuki pemisah partikel. Karena kecepatan gas yang tinggi, *pressure drop* dari pembelokkan arus tinggi. Jari-jari bagian siku harus cukup besar untuk meminimalkan *pressure drop* pada sendi.

## 2.13 Sumber Daya Lainnya

### 2.13.1 Penggunaan Air

Sebagian besar sistem *wet scrubber* melakukan sirkulasi ulang cairan *scrubber*. Untuk mengurangi kandungan zat padat dari cairan *scrubber*, sebagian cairan dikeluarkan dari sistem dan air bersih ditambahkan. *Venturi scrubber* biasanya memiliki konsentrasi padatan puncak 20 - 30%. beban arus gas PM yang lebih tinggi membutuhkan tingkat penambahan air yang lebih tinggi sehingga menghasilkan lebih banyak limbah cair dan biaya pembuangan yang lebih tinggi.

Aliran massa partikel ke dalam cairan scrubber adalah:

$$\dot{m}_{PM} = \eta L_{PM} Q_i \dots\dots\dots(2.38)$$

Dimana,

$\dot{m}_{PM}$  = laju alir massa PM  
 $\eta$  = efisiensi pengumpulan *scrubber*  
 $L_{PM}$  = beban PM di inlet  
 $Q_i$  = laju aliran gas buang di inlet

Dengan menggunakan kerapatan air, 1,0 kg/L (8,3 lb/gal), dan konsentrasi padatan, laju pengeluaran untuk cairan *scrubber* dapat dihitung sebagai:

$$Q_{bleed} = \frac{\dot{m}_{PM}}{f_{solid} \rho_{water}} \dots\dots\dots(2.39)$$

Dimana,

$Q_{bleed}$  = tingkat pengeluaran air  
 $f_{solid}$  = fraksi massa padatan dalam air resirkulasi  
 Laju alir total air yang dibutuhkan oleh sistem,  $Q_T$ , adalah jumlah air yang menguap dan air yang dikeluarkan.

$$Q_{T(water)} = Q_{wv(evap)} + Q_{bleed} \dots\dots\dots(2.40)$$

Total air yang digunakan setiap tahun adalah:

$$V_{T(water)} = Q_{T(water)} t \dots\dots\dots(2.41)$$

Dimana,

$V_{T(water)}$  = volume air yang digunakan setiap tahun  
 $t$  = waktu operasi *scrubber* per tahun

### 2.13.2 Penggunaan Daya Listrik

Dari *pressure drop* di seluruh sistem, tenaga fan yang dibutuhkan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$HP_{fan} = \frac{\Delta P Q_i}{6356 \eta_{fan}} \dots\dots\dots(2.42)$$

Dimana,

$HP_{fan}$  = daya dari fan dalam HP  
 $\eta_{fan}$  = efisiensi dari fan



$\Delta P$  = tekanan dari fan dalam inci kolom air  
 Daya yang dibutuhkan untuk meresirkulasi cairan *scrubber* melalui sistem dihitung sebagai berikut:

$$HP_{pump} = \frac{\Delta P_{pump} L/G \frac{Q_i}{1000} \gamma}{3952,6 \eta_{pump}} \dots\dots\dots (2.43)$$

Dimana,

- $HP_{pump}$  = daya dari pompa dalam HP
- $\eta_{pump}$  = efisiensi pompa
- $\Delta P_{pump}$  = tekanan pompa dalam ft kolom air
- $L/G$  = rasio cairan ke gas dalam gal/100ft<sup>3</sup>
- $Q_i$  = laju aliran di inlet dalam acfm
- $\gamma$  = berat jenis cairan *scrubber*

**Tabel 2.6** Kebutuhan Energi Pompa dan Fan (1000 cfm,  $\eta = 90\%$  pada  $\mu m$ )

Tipe <i>Scrubber</i>	Aliran Cairan (gpm)	Tekanan (psig)	Daya Pompa (HP)	$\Delta P$ Gas (in. wg)	Daya Fan (HP)	Relative HP/1000 cfm
<i>Wet Cyclone</i>	10	60	0,91	8	2,5	3,41
<i>Venturi</i>	10	20	0,233	15	3,94	4,27
<i>Jet Venturi</i>	40	70	3,28	0	0	3,28

## 2.14 Kelebihan dan Kekurangan *Wet Scrubber*

### 2.14.1 Kelebihan *Wet Scrubber*

Kelebihan dari penggunaan *wet scrubber* jenis *venturi scrubber* sebagai salah satu alternatif pengendalian pencemaran udara menurut Cooper, 1994 adalah:

1. Dapat menangani debu yang mudah terbakar dan meledak dengan resiko kecil;
2. Dapat menangani *mists*;
3. Perawatan yang relative mudah;
4. Perencanaan sederhana dan mudah untuk dipasang;
5. Efisiensi pengumpulan dapat bervariasi;

6. Menyediakan pendinginan gas panas;
7. Gas korosif dan debu – debu dapat dinetralisasi.

#### **2.14.2 Kekurangan Wet Scrubber**

Kekurangan dari penggunaan *wet scrubber* jenis *venturi scrubber* sebagai salah satu alternatif pengendalian pencemaraan udara menurut Cooper, 1994 adalah:

1. Effluen cairan dapat menyebabkan pencemaran air;
2. Produk limbah dikumpulkan dalam keadaan basah;
3. Potensi tinggi untuk masalah korosi;
4. Diperlukan perlindungan untuk pembekuan;
5. Gas yang keluar membutuhkan pemanasan ulang untuk menghindari *visible plume*;
6. PM yang telah terkumpul dapat terkontaminasi dan tidak dapat diolah kembali;
7. Pembuangan limbah lumpur kemungkinan sangat mahal.

## BAB 3 GAMBARAN UMUM WILAYAH PERENCANAAN

### 3.1 Sejarah Perusahaan

PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., merupakan industri baja pertama dan terbesar di Indonesia. Awalnya Presiden Soekarno mencanangkan Proyek Besi Baja Trikora yang bekerja sama dengan Uni Soviet pada tahun 1960. PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., secara formal didirikan pada tahun 1970 ketika pemerintah Indonesia mengeluarkan Peraturan Pemerintah Nomor 35 tanggal 31 Agustus tahun 1970, yang menetapkan kelanjutan proyek Pabrik Baja Trikora dengan mengubahnya kedalam bentuk badan hukum Perseroan Terbatas. Keluarnya Peraturan Pemerintah di atas, dapat dikatakan sebagai lahirnya PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.

Pembangunan PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., tahap 1 dengan kapasitas produksi 500.000 ton/tahun terjadi pada tahun 1975. Proyek itu berbentuk pabrik kawat baja, pabrik baja tulangan dan pabrik baja profil. Pada 1977, Presiden Suharto meresmikan pabrik *reinforcing bar*, *section steel* dan pelabuhan khusus Cigading. Perkembangan PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., sebagai perusahaan yang bergerak di bidang industri baja berlangsung cukup maju. Pengoprasian fasilitas produksi dilakukan sejak tahun 1977 sampai tahun 1993. Hal ini terbukti dari peresmian pabrik besi spons PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., yang memanfaatkan teknologi *direct reduction* dari Hylsa, pabrik *billet steel* (*Electric Arc Furnace*), pabrik *wire rod mill*, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 400 MW, dan fasilitas pengolahan Air (2000 L/detik) serta PT. KHI Pipe oleh Presiden Suharto pada tahun 1979.

PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., memisahkan beberapa unit sebagai anak perusahaan pada tahun 1996. Bersama sepuluh anak perusahaan PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., sanggup memajukan usahanya pada usaha –usaha penunjang yang menghasilkan berbagai produk baja bernilai tambah tinggi (seperti pipa spiral, pipa ERW, baja tulangan, baja profil), menyediakan utilitas industri (air bersih, tenaga listrik), industri infrastruktur (pelabuhan, kawasan industri), industri jasa teknik (konstruksi, rekayasa), teknologi informasi, serta menyediakan layanan

kesehatan. Produk – produk baja PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., ini tak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan baja nasional, tetapi juga dipasarkan secara internasional.

### **3.2 Lokasi Perusahaan**

PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., beralamat di Jalan Industri No. 5 PO BOX 14 Cilegon, dengan kantor pusat bertempat di Wisma Baja Jalan Gatot Subroto Kav. 54 PO BOX 1174 Jakarta 12950. Memiliki luas keseluruhan 350 Ha. Lokasi ini sangat strategis dimana sarana dan prasarana yang ada di daerah Cilegon sangat menunjang untuk pertumbuhan industri baja. Tata letak perusahaan dan anak perusahaan dapat dilihat pada Gambar 3.1. Berdasarkan letak geografisnya, PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., dibatasi oleh:

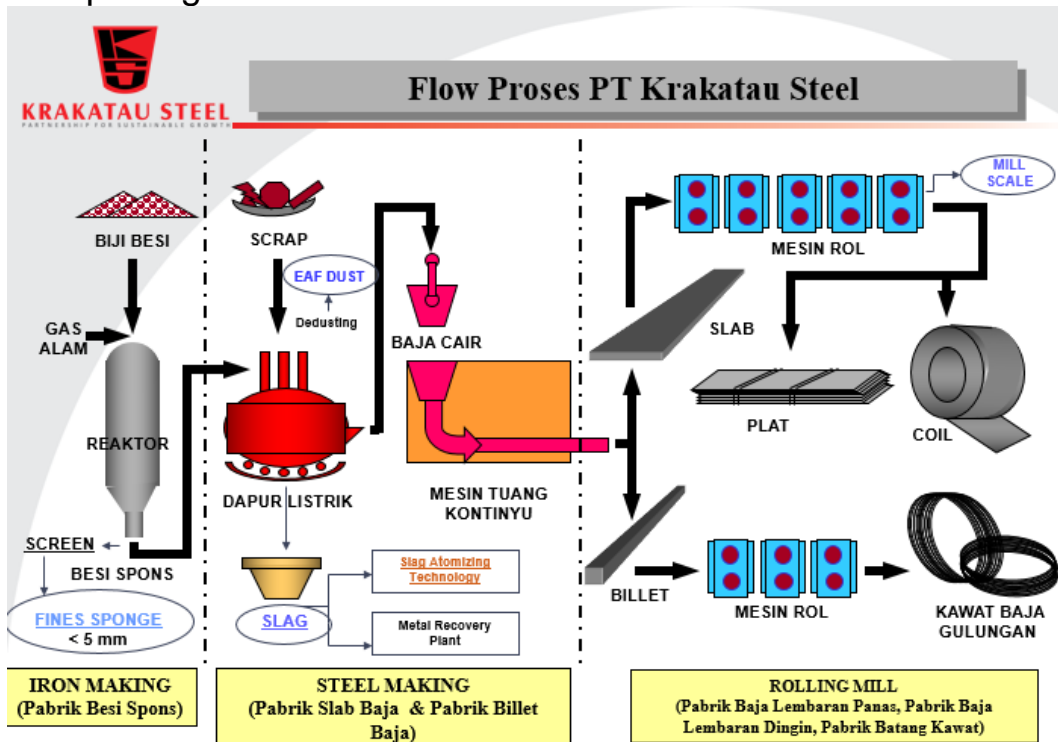
- Utara : berbatasan dengan pabrik – pabrik di Kawasan Industri Krakatau
- Selatan : berbatasan dengan Jalan Raya anyer
- Barat : berbatasan dengan Selat Sunda
- Timur : berbatasan dengan pabrik – pabrik di Kawasan Industri Krakatau



**Gambar 3.1** Peta PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.

### 3.3 Proses Produksi Baja Secara Umum

Kegiatan proses produksi di PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk. Menghasilkan tiga produk akhir yaitu *hot rolled coil*, *cold rolled coil*, dan *wire rod*. Secara umum kegiatan proses produksi terbagi menjadi 3 (tiga) yaitu proses reduksi besi, proses peleburan dan pengecoran, dan proses penggulangan. Proses produksi ini dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 3.2** Alur Proses Produksi PT. Krakatau Steel (Persero)Tbk.

PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., terdiri dari 7 unit pabrik yang memproduksi jenis baja yang berbeda menurut bentuk, ukuran dan jenisnya. Proses produksi dimulai dari pengolahan bijih besi atau pellet sampai menjadi produk *coil*, *sheet*, *plates*, dan *wire rod*. Proses produksi dilakukan dari Pabrik Besi Spons, Pabrik *Billet* Baja, Pabrik *Slab* Baja 1 dan 2, Pabrik *Hot Strip Mill*, Pabrik *Wire Rod Mill* dan Pabrik *Cold Rolling Mill* dengan uraian proses produksi sebagai berikut:

1. Pabrik Besi Spons

Pabrik Besi Spons (*DR plant*) mengolah bahan baku bijih besi atau pellet, lalu dilakukan proses reduksi dengan menggunakan gas alam yang berupa  $\text{CH}_4$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  dari

reformer. Besi spons ini merupakan bahan baku dari Pabrik *Billet* Baja, Pabrik *Slab* Baja I dan Pabrik *Slab* Baja II.

Pabrik ini memanfaatkan gas alam dengan proses yang dikenal dengan reduksi langsung menggunakan teknologi Hyl dari Meksiko. Bahan mentah berupa bijih besi pellet ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) diubah menjadi besi spons (Fe) dengan memanfaatkan gas alam ( $\text{CH}_4$ ) dan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). DR *plant* memiliki tiga pabrik yaitu Hyl I, II, dan III yang terdiri dari unit pembangkit gas pereduksi dan unit reduksi *iron ore* (bijih besi). Pada saat ini hanya Hyl III yang masih beroperasi, dikarenakan usia penggunaan Hyl I dan II sudah tidak efektif lagi.

2. Pabrik *Billet* Baja (*Billet Steel Plant/ BSP*)

Pabrik *Billet* Baja mulai beroperasi pada tahun 1979. Pabrik ini memproduksi baja batangan dengan bahan baku utamanya terdiri dari spons, *scrap*, kapur, *alloys* (Al, FeMn, FeHg, FeSi). BSP menghasilkan baja batangan (*long iron*) dengan kapasitas produksi 675.000 Ton/tahun. Jenis *billet* yang dihasilkan memiliki ukuran penampang 120 x 120 mm, 130 x 120 mm dan panjang maksimum mencapai 12.000 mm.

3. Pabrik *Slab* Baja (*Slab Steel Plant/ SSP*)

Pabrik *Slab* Baja PT. Krakatau Steel mulai beroperasi tahun 1983. Pada awalnya pabrik *slab* baja ini terdiri dari empat dapur yang masing – masing berkapasitas 250.000 Ton/tahun. Sejak tahun 1992 pabrik ini dikembangkan dengan menambah dua dapur dengan kapasitas 800.000 Ton/tahun. Pabrik ini menggunakan bahan baku utama yang sama dengan pabrik *billet*. *Slab* baja yang dihasilkan mempunyai ukuran tebal 150 – 120 mm, lebar 600 – 2080 mm dan panjang maksimumnya 12.000 mm. berat maksimal masing – masing *slab* adalah 30 ton.

4. Pabrik Baja Lembaran Panas (*Hot Strip Mill/ HSM*)

Pabrik ini terdiri dari *Rolling Mill* yang memproduksi *coil*, *shearing line*, dan *skin pass mill* yang memproduksi *plate*. Produksi *slab* baja digunakan sebagai bahan baku pabrik ini. Pabrik HSM ini mulai beroperasi pada tahun 1983. Memiliki ukuran ketebalan 1,8 – 25 mm dengan lebar 650

– 2080 mm dan berat maksimal mencapai 30 ton/(*sheet/plate/coil*). Hasil dari pabrik ini banyak dimanfaatkan untuk pipa, bangunan, dan bahan konstruksi kapal.

5. Pabrik Baja Lembaran Dingin (*Cold Rolling Mill/CRM*)

Pabrik ini bergabung sebagai unit produksi PT. Krakatau Steel pada tahun 1 Oktober 1991. Bahan baku pabrik ini adalah baja lembaran panas (*coil*) dari pabrik HSM, yang kemudian mengalami penggulangan dingin untuk mendapatkan produk baja lembaran dengan ketebalan 0,18 – 3 mm. kapasitas produksi per tahunnya adalah 85.000 ton. Produksi baja yang dihasilkan digunakan untuk komponen bagian dalam mobil atau motor, peralatan rumah tangga, kaleng, dan lainnya.

6. Pabrik Baja Batang Kawat (*Wire Rod Mill/ WRM*)

Pabrik *Wire Rod* awalnya bernama *Wire Rod and Strip Mill*, karena pabrik ini didesain untuk memproduksi dua jenis produk yaitu *wire rod* dengan diameter 5,5 – 12 mm dan *strip* dengan lebar maksimal 360 mm dan tebal minimum 2 mm, dengan kapasitas 220.000 MT/tahun. Pabrik ini mulai beroperasi pada tahun 1979. Pabrik ini menghasilkan batang kawat baja yang diaplikasikan untuk senar piano, mur, paku, baut, pegas, kawat baja, dan lainnya.

Dari penjelasan proses produksi PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., di atas dapat disimpulkan, terdapat 3 jenis proses produksi yang terjadi yaitu *iron making*, *steel making* dan *rolling mill*. Pada setiap proses produksi terdapat produk sampingan sebagai berikut:

1. *Iron Making*

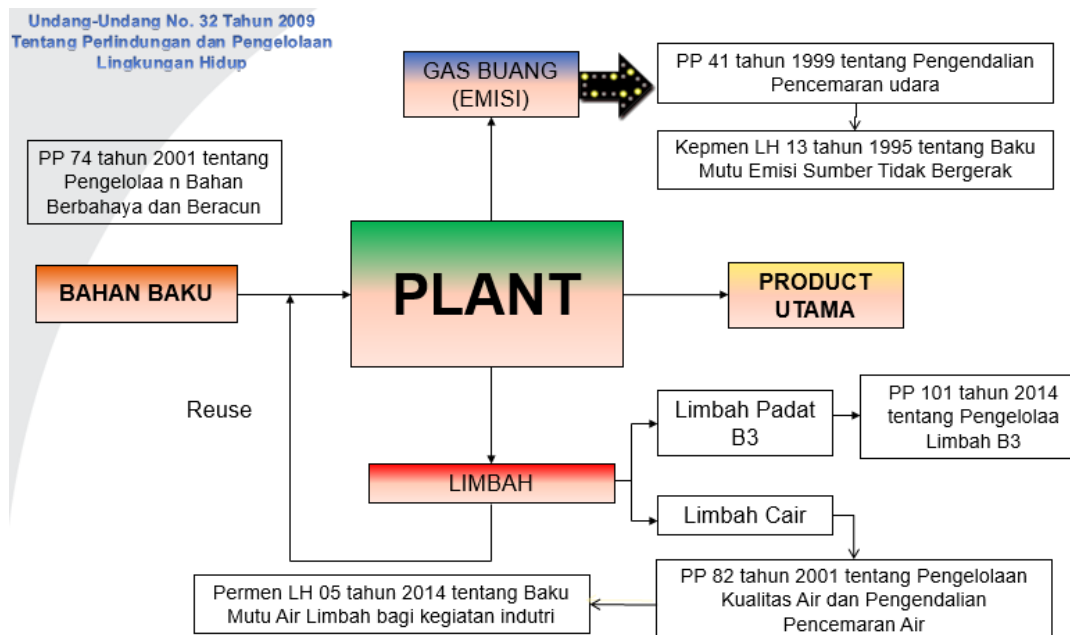
Pada proses *iron making* produk sampingan yang dihasilkan berupa *sludge*, *fine pallete* dan *fine sponge* yang berdiameter kurang dari 5 mm.

2. *Steel Making*

Pada proses *steel making* produk sampingan yang dihasilkan berupa *sludge*, *slag*, *EAF dust*, dan *mill scale*.

### 3. Rolling Mill

Pada proses *rolling mill* produk sampingan yang dihasilkan berupa *sludge*, *mill scale*, *sludge slurry cake*, dan *ferro oxide*.



**Gambar 3.3** Diagram Proses Produksi secara Umum dan Peraturan Terkait Lingkungan

### 3.4 Pengelolaan Kualitas Udara PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.

Pabrik ini dilengkapi dengan *Wet Scrubber*, sehingga kualitas udara terjaga (tidak melebihi baku mutu) sebagaimana diatur dalam ketentuan Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara dan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak.

Pemantauan terhadap kualitas udara emisi dan ambien dilakukan dua kali dalam setahun. Pemantauan kebisingan lingkungan, debu jatuh di area perkampungan, kawasan dan perkotaan dilakukan setiap bulan dan hasilnya dilaporkan melalui laporan pelaksanaan RKL/RPL secara rutin setiap triwulan ke instansi pemerintahan terkait.

Berikut beberapa alternative yang dilakukan PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., terkait pengelolaan kualitas udara.



1. Dilakukan program penyiraman jalan secara rutin untuk menghinfari debu *fugitive* berlebih.
2. Pemasangan alat ukur emisi secara kontinyu/ *Continuous Emission Monitoring System (CEMS)* untuk memantau emisi secara terus menerus.
3. Pemasangan alat ukur udara amibien (*Air Ambient Quality Monitoring System*).
4. Progam penanaman pohon untuk menyerap CO<sub>2</sub> yang dihasilkan.
5. Pemanfaatan gas buang CO<sub>2</sub> oleh pihak ketiga digunakan sebagai bahan baku CO<sub>2</sub> cair.

### **3.5 Gambaran Lokasi Perencanaan *Wet Scrubber***

Proyek *blast furnace* dimulai tahun 2014 dengan biaya sebesar Rp 1.809.612.00.000. Proyek ini bekerja sama dengan MCC-CERI. Pengerjaan konstruksi dilakukan oleh anak perusahaan PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., yaitu PT. Krakatau Engineering. *Progress* terbaru terkait proyek ini pada tanggal 12 Februari 2018 adalah sebesar 62% dan diharapkan selesai pada akhir 2018.

Proyek *Blast Furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., memiliki kapasitas produksi yang direncanakan sebesar 1.200.000 ton/tahun.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## **BAB 4 METODELOGI PERENCANAAN**

### **4.1 Umum**

Tugas akhir ini merencanakan *preliminary sizing* sistem pengendalian pencemaran udara di PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., menggunakan *wet scrubber* tipe *venturi*. Hasil dari perencanaan tersebut akan didapatkan rencana dasar, gambar rencana, *Standard Operational and Procedure* (SOP) dan biaya *operation and maintainance*.

### **4.2 Kerangka Perencaan**

Kerangka perencanaan berfungsi untuk memudahkan dalam merencanakan sesuai dengan tahapan yang dibuat. Kerangka perencanaan terdiri dari beberapa tahap, yaitu:

#### **4.2.1 Studi Literatur**

Studi literatur merupakan teori yang menjadi dasar yang mendukung perencanaan yang akan dilakukan. Sumber literatur yang digunakan berasal dari buku, jurnal, makalah seminar, skripsi, thesis dan disertasi yang dapat dipertanggungjawabkan isinya. Dalam tugas akhir ini, literatur yang dikaji meliputi pengetahuan umum tentang pencemaran udara, perencanaan sistem *wet scrubber*, *venturi scrubber* dan baku mutu yang digunakan untuk mengevaluasi sistem pengendalian pencemaran udara.

#### **4.2.2 Pengumpulan Data**

Data yang digunakan untuk perencanaan ini adalah data sekunder. Adapun data – data yang digunakan antara lain:

- Karakteristik emisi.  
Karakteristik emisi yang digunakan antara lain, laju aliran gas yang dikeluarkan, *pollutant loading*, temperatur emisi, kelembaban relatif, dan *size distribution* dari emisi.
- *Design parameters*  
*Design parameters* yang digunakan yaitu, *pressure drop*, rasio *liquid-to-gas* (L/G), ukuran *droplet*, dan waktu tinggal.

#### **4.2.3 Pengolahan Data dan Perencanaan *Wet Scrubber***

Perencanaan dilakukan berdasarkan data-data yang didapatkan. Keluaran dari perencanaan ini adalah gambar rencana *Wet Scrubber*, dan *Cost Analysis*. Langkah awal *preliminary design Wet Scrubber*, yaitu:

1. Menentukan kapasitas produksi maksimum.
2. Menentukan *pollutant loading* PM yang akan diolah.  
*Pollutant loading* PM yang akan diolah dapat dihitung menggunakan tipikal PM yang dikeluarkan *blast furnace* yaitu sebesar 10 – 40 kg/ton baja (Cheremisinoff, 2002).
3. Menganalisis sebaran partikel, densitas dan ukuran partikel.
4. Pemilihan jenis pengendalian yang digunakan sesuai dengan karakteristik emisi dan kapasitas produksi.

#### **4.2.4 Pemilihan Jenis *Wet Scrubber***

Memilih tipe *scrubber* yang akan digunakan harus mempertimbangkan tiga faktor utama, yaitu:

1. Faktor Analisis Ekonomi  
Faktor ini harus mempertimbangkan beberapa aspek seperti biaya capital dan proyeksi biaya operasi, serta estimasi biaya pembuangan dan *product recovery*.
2. Faktor Lingkungan  
Untuk pemasangan dalam skala besar harus memiliki izin lingkungan. Kemungkinan visibilitas dari *plume*, masalah pencemaran air, kebisingan, dan kapasitas *standby*.
3. Faktor Teknis  
Faktor ini adalah faktor utama dalam mendesain seperti sifat polutan dan sampai sejauh mana polutan tersebut harus dikendalikan.

#### **4.2.5 Perhitungan Desain *Wet Scrubber***

Langkah-langkah perhitungan desain *wet scrubber* seperti yang telah dijabarkan pada Bab 2.

#### **4.2.6 Perhitungan Efisiensi *Wet Scrubber***

Efisiensi pengumpulan berdasarkan massa:

$$\eta_m = \frac{m_i - m_o}{m_i} = \frac{l_i - l_o}{l_i} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana,

$\eta_m$  adalah efisiensi pengumpulan keseluruhan

$m_{i,o}$  adalah *mass flow rate in* dan *out*

$l_{i,o}$  adalah beban partikel *in* dan *out*

Langkah selanjutnya adalah melakukan perencanaan *Wet Scrubber* secara detail dengan tahapan berikut:

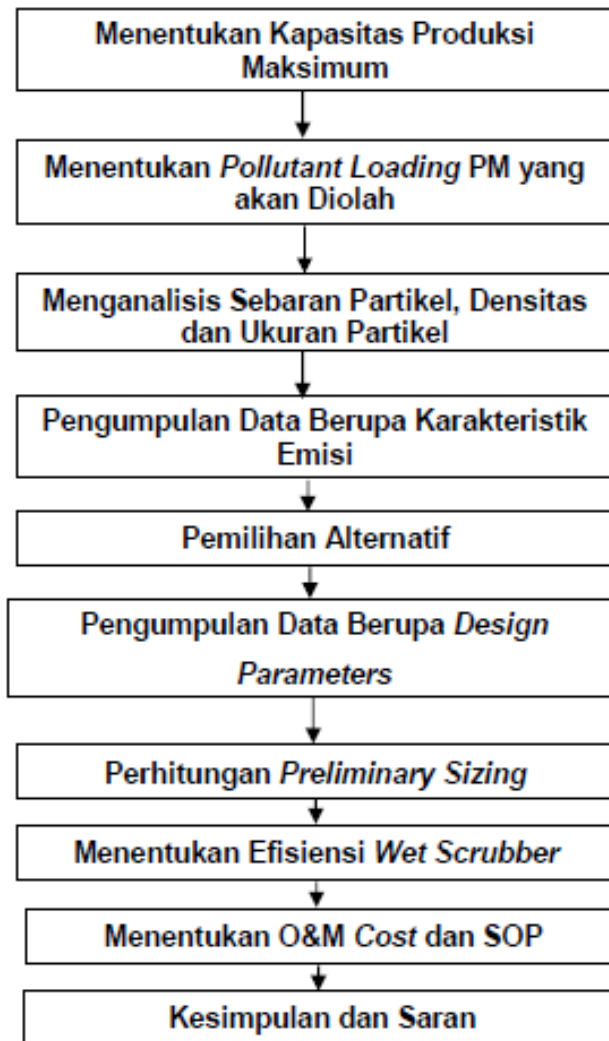
1. Menggambarkan diagarm alir proses
2. Menetapkan kriteria perencanaan
3. Menghitung dimensi
4. Menghitung kesetimbangan massa (*mass balance*)
5. Menggambarkan tata letak bangunan (*layout*)
6. Membuat O&M Cost

### 4.3 Pembuatan Laporan

Pembuatan laporan merupakan hasil perencanaan sesuai dengan data dan studi literatur yang diperoleh, dari awal hingga akhir perencanaan.

### 4.4 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran diperoleh dari hasil perencanaan yang telah dilakukan. Kesimpulan merupakan jawaban dari tujuan perencanaan yang telah dibuat. Saran diberikan berkenaan dengan pengembangan ataupun tindak lanjut dari kesimpulan tugas akhir ini.



**Gambar 4.1** Diagram Alir Metodologi Perencanaan

## BAB 5 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Analisis Kapasitas Produksi

Kapasitas produksi maksimum yang direncanakan untuk *blast furnace* adalah sebesar 1.200.000 ton/tahun. Kapasitas produksi tersebut adalah kapasitas produksi maksimum dari *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk.

### 5.2 Analisis *Mass Balance* PM

Analisis *mass balance* dilakukan dengan menghitung prosentase setiap elemen penyusun PM dengan konsentrasi partikulat. Terdapat sepuluh kelompok ukuran partikulat yang diketahui yaitu berkisar antara, 18  $\mu\text{m}$  sampai 0,02  $\mu\text{m}$ . dikelompokkan menjadi tiga kelompok besar yaitu PM<sub>10</sub>, *coarse* PM (PM<sub>10-2,5</sub>), *fine* PM (PM<sub>2,5</sub>) dan submikron PM (PM<sub>1</sub>).

**Table 5.1** Distribusi Ukuran Partikulat

<b>Stage</b>	<b>Cut Diameter</b>	<b>Rentang Ukuran PM</b>	<b>Ukuran Rata-Rata PM</b>
	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
S0	18	>18	
S1	10	10 - 18	14
S2	5,6	5,6 - 10	7,8
S3	3,2	3,2 - 5,6	4,4
S4	1,8	1,8 - 3,2	2,5
S5	1	1 - 1,8	1,4
S6	0,56	0,56 - 1	0,78
S7	0,32	0,32 - 0,56	0,44
S8	0,18	0,18 - 0,32	0,25
SP	0,02	0,02 - 0,18	0,1

**Tabel 5.2** Kandungan Elemen dan Ukuran Diameter Partikulat pada Gas Buang

Kandungan	Prosentase (%)	MMAD ( $\mu\text{m}$ )
CaO	8,68	6,7
SiO	3,38	5,4
MnO	2,17	5,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1	5,3
TiO <sub>2</sub>	0,24	5,3
Fe Total	47,78	5,2
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	2,3
MgO	9,47	2
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	1,4
P	0,106	0,9
S	1,08	0,8

Dari kedua tabel di atas dapat ditentukan pada *stage* berapa elemen tersebut akan tertangkap dan *ter-removal*.

**Tabel 5.3** *Stage Removal* Setiap Elemen pada Gas Buang

Kandungan	Prosentase (%)	MMAD ( $\mu\text{m}$ )	Stage
CaO	8,68	6,7	S2
SiO	3,38	5,4	S3
MnO	2,17	5,4	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1	5,3	
TiO <sub>2</sub>	0,24	5,3	
Fe Total	47,78	5,2	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	2,3	S4
MgO	9,47	2	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	1,4	S5
P	0,106	0,9	S6



Kandungan	Prosentase (%)	MMAD ( $\mu\text{m}$ )	Stage
S	1,08	0,8	

### 5.3 Analisis Sebaran Partikel, Densitas dan Ukuran

Analisis sebaran partikel, densitas dan ukuran partikel ini menggunakan penelitian yang telah dilakukan dengan kondisi wilayah kawasan industri peleburan baja yang menggunakan *blast furnace*. Berdasarkan jurnal, sebaran ukuran partikel dari gas buang *blast furnace* adalah sebesar  $0,1 - 1,0 \mu\text{m}$  secara general dan  $3,2 - 8,0 \mu\text{m}$  secara spesifik. Untuk  $d_{50}$  atau *mass median aerodynamic diameter* (MMAD) adalah sebesar  $5,4 \mu\text{m}$ . Dan untuk *geometric standard deviation* (GSD) 4,8 (Mohiuddin, 2014).

Berdasarkan data yang didapatkan dari PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., densitas dari gas buang adalah sebesar  $0,01 \text{ kg/m}^3$ .

### 5.4 Pemilihan Jenis Pengendalian

Jenis pengendalian pencemaran udara yang digunakan adalah *wet scrubber* tipe *venturi*. *Mist eliminator* menggunakan desain jenis *chevron* untuk menghindari penyumbatan. Pada perencanaan kali ini dipilih *throat* jenis *fixed throat* dengan *throat section* berbentuk melingkar. Untuk alat – alat bantu menggunakan ID fan untuk meningkatkan *pressure drop* dan menggunakan *quencher* untuk menurunkan temperatur gas yang masuk ke *scrubber*.

### 5.5 Preliminary Sizing Wet Scrubber

#### 5.5.1 Beban dan Distribusi Partikel

Desain dan kinerja *scrubber* sangat bergantung pada sifat partikel dalam aliran gas buangan. Seperti dibahas sebelumnya, sifat yang paling penting adalah distribusi ukuran dan beban partikel. Distribusi dan beban partikel sumber spesifik menentukan alat pengumpulan PM yang paling efisien.

Karena partikel memiliki berbagai bentuk dan densitas, ukuran partikel biasanya dinyatakan sebagai diameter aerodinamis. Diameter aerodinamis partikel adalah diameter bidang dengan densitas air yang mengendap dalam udara pada

tingkat yang sama dengan partikel yang bersangkutan. Distribusi ukuran biasanya diukur dengan menggunakan *cascade impactor*, yang memisahkan partikel berdasarkan diameter aerodinamis pada lempeng. Massa partikel pada setiap lempeng *impactor* diukur.

Diameter rata-rata geometris adalah diameter aerodinamis persentil ke-50 (juga disebut sebagai *mass median particle diameter*). Menurut definisi, standar deviasi dari distribusi log-normal adalah rasio dari persentil ke-84 sampai ukuran partikel persentil ke-50:

$$\sigma = \frac{d_{84}}{d_{50}}$$

$$4,8 = \frac{d_{84}}{5,4}$$

$$d_{84} = 25,92$$

Dimana,

$\sigma$  = standar deviasi  
 $d_{50}$  = diameter partikel persentil ke-50  
 $d_{84}$  = diameter partikel persentil ke-84

Beban PM yang akan diolah dapat ditentukan melalui tipikal PM yang dikeluarkan oleh *blast furnace* yaitu sebesar 10 – 40 kg/ton baja. Maka, *flow rate* PM yang akan diolah adalah sebesar

*Flow rate* = tipikal PM dikeluarkan x kapasitas produksi  
*Flow rate* = 40 kg/ton baja x 1.200.000 ton/tahun  
 = 48.000.000 kg/tahun  
 = 131.506,8493 kg/hari  
 = 5.479,4521 kg/jam  
 = 1,5221 kg/detik

### 5.5.2 Sifat Gas Buang

Sifat fisik dan kimia dari gas buangan umumnya diberikan kepada *vendor* untuk mengukur sistem *scrubber* dengan benar dan memilih bahan fabrikasi yang sesuai. Sifat ini memiliki dampak langsung pada *capital* dan *annual cost* yang terkait dengan desain *scrubber*.

Diketahui:

$$\begin{aligned} Q \text{ partikulat} &= 1,5221 \text{ kg/s} \\ \text{Densitas} &= 0,115 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volume} &= 13,236 \text{ m}^3 \\ \text{Massa} &= 1,522 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q \text{ gas buang} &= 13,257 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{Densitas} &= 0,01 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volume} &= 1325,683 \text{ m}^3 \\ \text{Massa} &= 13,257 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q \text{ udara kering} &= 0,021 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{Densitas} &= 0,946 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volume} &= 22,386 \text{ m}^3 \\ \text{Massa} &= 0,021 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat molekul uap air} &= 18,015 \text{ kg/kmol} \\ \text{Berat molekul udara kering} &= 28,97 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned} \text{Kadar air } (\theta_{\text{air}}) &= \frac{V_{wv}}{V_a + V_{wv}} \\ &= \frac{13,236}{0,0224 + 13,236} = 0,998 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio kelembaban } (\omega) &= \frac{m_{wv}}{m_a} \\ &= \frac{1,522}{0,21} = 71,875 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Hubungan } \theta_{\text{air}} \text{ dan } \omega &= \omega \frac{MW_{wv}}{MW_a} \\ &= 71,875 \frac{18,015}{28,97} = 44,696 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q \text{ dalam keadaan STP} &= Q_1 \frac{T_2}{T_1} \\ &= 13,257 \frac{273}{523} = 6,920 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Laju alir massa} &= Q \frac{MW}{V_{mol}} \\ &= 6,920 \frac{18,015}{0,224} = 5568,85 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Laju alir uap air} &= [Q_{m(in)} \times \theta_{air(in)}] \frac{MW_{wv}}{V_{mol}} \\
 &= [13,257 \times 0,998] \frac{18,015}{0,224} \\
 &= 10650,5 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Laju alir udara kering} &= [Q_{m(in)} (1 - \theta_{air(in)})] \frac{MW_{wv}}{V_{mol}} \\
 &= [13,257 (1 - 0,998)] \frac{18,015}{0,224} \\
 &= 18,014 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Konsentrasi pencemar} &= \frac{\text{massa partikulat}}{\text{volume gas}} \\
 &= \frac{152210 \text{ mg}}{3,030211 \text{ m}^3} \\
 &= 50.231 \text{ mg/m}^3
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas dapat ditentukan parameter awal dari partikulat yaitu 50.231 mg/m<sup>3</sup>. Sedangkan, baku mutu untuk parameter tersebut sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia nomor 13 tahun 1995 adalah sebesar 150 mg/m<sup>3</sup>.

### 5.5.3 Psychrometric Chart

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 \text{Volume udara jenuh} &= 27,5 \text{ ft}^3 &= 0,779 \text{ m}^3 \\
 \text{Laju alir udara kering} &= 18,014 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}
 \text{Laju alir volumetrik } (Q_{m(out)}) &= v \dot{m}_a \\
 &= 0,779 \times 18,014 \\
 &= 14,027 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio kelembaban } (\omega_{out}) &= \frac{m_{wv}}{m_a} \\
 &= \frac{0,090}{0,021} \\
 &= 4,229
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Laju massa uap air outlet} &= \omega_{(out)} \dot{m}_a \\
&= 4,229 \times 18,014 \\
&= 76,174 \text{ kg/s} \\
\\
\text{Laju air yang diuapkan} &= \dot{m}_{wv(out)} - \dot{m}_{wv(in)} \\
&= 76,174 - 18,014 \\
&= 58,161 \text{ kg/s} \\
\\
\text{Volume air pengganti} &= \frac{\dot{m}_{wv(evap)}}{\rho_{air}} \\
&= \frac{58,161}{1000} \\
&= 0,058 \text{ m}^3/\text{s}
\end{aligned}$$

## 5.6 Alternatif *Wet Scrubber*

Rangkaian alternatif dibuat berdasarkan karakteristik dari gas buang itu sendiri. Untuk itu, pemilihan jenis *wet scrubber* perlu untuk dilakukan. Pemilihan jenis *wet scrubber* dilakukan atas dasar jenis *wet scrubber* yang mampu menghasilkan effluen yang paling optimal dengan berbagai pertimbangan baik itu secara ekonomis maupun teknis.

Dari karakteristik gas buang di atas, maka dapat diperoleh beberapa macam alternatif, yaitu:

### 1. Alternatif I

*Venturi scrubber* lebih mahal dari *spray tower*, *cyclonic*, atau *tray tower scrubber*, namun efisiensi koleksi untuk PM halus lebih tinggi. Kecepatan gas yang tinggi dan turbulensi di *venturi throat* menghasilkan efisiensi pengumpulan yang tinggi, berkisar antara 70% sampai 99% untuk partikel dengan diameter yang lebih besar dari 1  $\mu\text{m}$  dan lebih besar dari 50% untuk partikel submikron. Meningkatnya *pressure drop* pada *venturi scrubber* meningkatkan efisiensinya. Namun permintaan energi pada sistem juga meningkat sehingga menyebabkan biaya operasional lebih besar. *Capital* dan *O&M cost* cukup tinggi daripada biaya untuk *spray tower* sederhana.

## 2. Alternatif II

*Cyclonic spray tower* memiliki efisiensi pengumpulan yang lebih besar dari pada *spray tower* sederhana karena kecepatan relatif yang lebih besar antara *droplet* dan gas buang di menara siklon. Efisiensi pengumpulan untuk jenis scrubber ini setinggi 95% untuk partikel lebih besar dari 5  $\mu\text{m}$ , dan 60% - 75% untuk partikel submikron. Kecepatan aliran gas berkisar antara 1 - 47  $\text{m}^3/\text{s}$  (1.500 - 100.000 scfm), dan daya untuk scrubber siklon umumnya 1 - 3,5 hp / 1000 cfm. *Capital cost* dan *O&M cost* sedikit lebih tinggi untuk *scrubber* jenis ini karena rancangannya yang lebih kompleks.

## 3. Alternatif III

*Spray tower* mengandalkan pengumpulan partikel dengan impaksi. Oleh karena itu, memiliki efisiensi pengumpulan yang tinggi untuk PM kasar. Efisiensi tipikal sebesar 90% untuk partikel yang lebih besar dari 5  $\mu\text{m}$ . Efisiensi untuk partikel berdiameter 3-5  $\mu\text{m}$  berkisar 60-80%. Di bawah 3  $\mu\text{m}$ , efisiensi menurun menjadi kurang dari 50%.

*Spray tower* memiliki *capital cost* lebih rendah daripada *wet scrubber* lainnya. Selain itu, *spray tower* umumnya memiliki konsumsi daya rendah dan tidak rentan terhadap pengotoran, sehingga biaya operasional juga turun. Biaya operasi *spray tower* meningkat untuk aplikasi PM halus, karena sistem semacam itu memerlukan rasio cairan terhadap gas yang tinggi (lebih dari 20 gal/1000  $\text{ft}^3$ ). Tingkat aliran gas tipikal untuk *spray tower* adalah 1 - 47  $\text{m}^3/\text{s}$  (1.500 - 100.000 scfm).

**Tabel 5.4** Perbandingan Efisiensi Removal Tiap Alternatif

No.	Alternatif	Konsentrasi Removal 1 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Konsentrasi Removal 2 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
1.	<i>Venturi Scrubber</i>	502	5

No.	Alternatif	Konsentrasi Removal 1 (mg/m <sup>3</sup> )	Konsentrasi Removal 2 (mg/m <sup>3</sup> )
2.	<i>Cyclonic Spray Tower</i>	2512	126
3.	<i>Spray Tower</i>	5023	502

Dari ketiga alternatif jenis *wet scrubber* tersebut, dipilih satu sistem yang akan direncanakan. Pemilihan sistem *wet scrubber* dilakukan berdasarkan pada pembobotan kesesuaian alternatif dengan baku mutu, operasional dan maintenance, serta investasi. Dengan adanya pembobotan tersebut, maka dapat dipilih alternatif dengan nilai terbesar. Hasil pembobotan masing-masing alternatif yaitu sebagai berikut.

**Tabel 5.5** Pembobotan Alternatif *Wet Scrubber*

No.	Alternatif	Baku Mutu	O&M	Capital Cost	Total
1.	<i>Venturi Scrubber</i>	3	3	2	8
2.	<i>Cyclonic Spray Tower</i>	2	2	3	7
3.	<i>Spray Tower</i>	1	1	2	4

Berdasarkan hasil pembobotan tersebut, nilai 3 merupakan nilai tertinggi yang menunjukkan bahwa alternatif tersebut sesuai atau sangat baik berdasarkan pada parameter yang dinilai (baku mutu, operasional dan *maintenance*, serta investasi) sedangkan 0 merupakan nilai terendah. Dari hasil pembobotan tersebut, diketahui bahwa *venturi scrubber* dan *cyclonic spray tower* telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan sehingga *venturi scrubber* mendapatkan nilai 3 dan *cyclonic spray tower* mendapatkan nilai 2. Setelah itu dilihat kemudahan operasional dan *maintenance*, serta investasi yang diperlukan pada masing-masing alternatif. Diperoleh nilai tertinggi yaitu pada *venturi scrubber*. Nilai ini diperoleh karena hasil baku mutu akhir pada *venturi scrubber* telah memenuhi, operasional dan *maintenance* mudah. Namun pada *venturi scrubber* diperlukan biaya investasi yang tinggi. Selebihnya, nilai hasil pembobotan menunjukkan bahwa pada

*venturi scrubber* diperoleh nilai tertinggi dari seluruh alternatif yang ada.

**Tabel 5.6** Perhitungan *Removal* Partikulat Awal

Rentang Ukuran Partikulat	Prosentase (%)	Removal (%)	Parameter Awal (mg/m <sup>3</sup> )
> 1 µm	39	99	19590
< 1 µm	1,70	50	854

**Tabel 5.7** Perhitungan *Removal* Partikulat Akhir

Rentang Ukuran Partikulat	Removal Tahap 1 (mg/m <sup>3</sup> )	Removal Tahap 2 (mg/m <sup>3</sup> )	Removal Tahap 3 (mg/m <sup>3</sup> )
> 1 µm	195,9002	1,9590	0,0196
< 1 µm	426,9620	213,4810	106,7405

Karena parameter belum memenuhi baku mutu maka *venturi scrubber* yang digunakan berjumlah dua buah yang dipasang secara seri.

## 5.7 Desain *Scrubber*

### 5.7.1 Menghitung *Pressure Drop*

Persamaan *pressure drop* untuk *venturi scrubber* adalah:

$$\Delta P = k v^2 \rho_g (L/G)$$

Dimana,

- $\Delta P$  = *pressure drop* di penampang *venturi*
- $v$  = kecepatan di *throat*
- $\rho_g$  = kerapatan gas
- $L/G$  = rasio cairan-gas
- $k$  = faktor korelasi untuk desain *scrubber* tertentu

Diketahui:

- $k$  =  $5,4 \times 10^{-4}$
- $v$  = 500 ft/s



$$\begin{aligned}\rho_g &= 0,01 \text{ kg/m}^3 = 6,24 \times 10^{-4} \text{ lb/ft}^3 \\ \text{L/G} &= 7 \text{ gal/1000ft}^3\end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}\Delta P &= 5,4 \times 10^{-4} \cdot (500)^2 \cdot 6,24 \times 10^{-4} \cdot 7 \\ &= 0,590 \text{ inci kolom air} \\ &= 0,014986 \text{ m kolom air}\end{aligned}$$

**Tabel 5.8** Parameter Operasi *Scrubber*

<b>Tipe Scrubber</b>	<b>Pressure Drop (in. H<sub>2</sub>O)</b>	<b>Rasio L/G (gal/1000 acf)</b>	<b>Tekanan Cairan (psig)</b>	<b>Kecepatan Gas (ft/s)</b>	<b>Cut Diameter (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<i>Spray Tower</i>	0,5 – 3	0,5 – 20	10 – 400	10	2 – 8
<i>Cyclonic</i>	2 – 10	2 – 10	10 – 400	105 – 140	2 – 3
<i>Venturi</i>	10 – 150	2 – 20	0,5 – 2	90 – 400	0,2

Dari perhitungan *pressure drop* di atas diketahui bahwa *pressure drop* standar operasi untuk *venturi scrubber*. *Pressure drop* untuk *venturi scrubber* berkisar antara 10 – 150 inci kolom air. Untuk memenuhi standar, maka rasio L/G akan dinaikkan menjadi 200 gal/1000ft<sup>3</sup>.

Diketahui:

$$\begin{aligned}k &= 5,4 \times 10^{-4} \\ v &= 500 \text{ ft/s} \\ \rho_g &= 0,01 \text{ kg/m}^3 = 6,24 \times 10^{-4} \text{ lb/ft}^3 \\ \text{L/G} &= 200 \text{ gal/1000ft}^3\end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}\Delta P &= 5,4 \times 10^{-4} \cdot (500)^2 \cdot 6,24 \times 10^{-4} \cdot 200 \\ &= 16,855 \text{ inci kolom air}\end{aligned}$$

Persamaan tersebut memprediksi *pressure drop* cukup baik pada rasio cairan-gas yang moderat. Pada rasio antara 3 -10 gal/1000 ft<sup>3</sup>, persamaan tersebut ditemukan berkinerja baik, namun pada rasio di atas 12 gal/1000 ft<sup>3</sup>, persamaan tersebut menghasilkan *pressure drop* 80% lebih dari perkiraan.

Model untuk *pressure drop* yang diterbitkan oleh Hesketh juga banyak digunakan. Model ini didasarkan pada korelasi data eksperimen yang diperoleh dari banyak *venturi scrubber* yang berbeda. Persamaan Hesketh untuk *pressure drop* adalah:

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0,133}}{507} \left( 0,56 + 0,125 \frac{L}{G} + 0,0023 \left( \frac{L}{G} \right)^2 \right)$$

Dimana,

$\Delta P$  = *pressure drop* di penampang *venturi* dalam inci H<sub>2</sub>O

$v$  = kecepatan di *throat* dalam ft/s

$\rho_g$  = kerapatan aliran gas jenuh dalam lb/ft<sup>3</sup>

$A$  = daerah penampang *throat* dalam ft<sup>2</sup>

$L/G$  = rasio cairan-gas dalam gal/1000 ft<sup>3</sup>

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$\Delta P = \frac{v^2 \rho_g A^{0,133} \left( \frac{L}{G} \right)^{0,78}}{1270}$$

Diketahui:

$v$  = 500 ft/s

$\rho_g$  = 0,01 kg/m<sup>3</sup> = 6,24 x 10<sup>-4</sup> lb/ft<sup>3</sup>

$L/G$  = 200 gal/1000ft<sup>3</sup>

$A$  = 10 ft<sup>2</sup>

Perhitungan:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{(500)^2 \cdot 6,24 \times 10^{-4} \cdot 10^{0,133} \cdot (200)^{0,78}}{1270} \\ &= 10,406 \text{ inci kolom air} \end{aligned}$$

Hesketh secara eksperimental menentukan hubungan antara *pressure drop* dan efisiensi pengumpulan. Berdasarkan data yang terkumpul, Hesketh menyimpulkan bahwa *venturi* pada dasarnya 100% efisien untuk partikel yang lebih besar dari 5  $\mu\text{m}$ . Dia mengembangkan korelasi antara *pressure drop* dan material lolos untuk ukuran partikel di bawah nilai di atas, dengan persamaan:

$$P_t = \frac{C_i}{C_o} = 3,47 \Delta P^{-1,43}$$

Dimana,

$C_i$  dan  $C_o$  = konsentrasi partikel < 5  $\mu\text{m}$  di inlet dan outlet *venturi scrubber* berbasis massa

Diketahui:

$\Delta P$  = 10,406 inci kolom air

Perhitungan:

$P_t$  =  $3,47 \cdot (10,406)^{-1,43}$   
= 0,122

Dari perhitungan tersebut diketahui material lolos untuk ukuran partikel di bawah 5  $\mu\text{m}$  adalah sebesar 0,122. Dengan *pressure drop* sebesar 10,406 inci kolom air partikulat yang disingkirkan adalah sebesar 87,8%.

### 5.7.2 Menghitung Daya Kontak

Daya kontak didefinisikan sebagai energi yang dikeluarkan per satuan volume gas yang diolah. Teori ini dikembangkan oleh Lapple dan Kamack dan diperluas oleh Semrau. Teori ini menyatakan bahwa semua *scrubber* memberikan tingkat pengumpulan partikel yang sama pada tingkat konsumsi daya yang sama, terlepas dari bagaimana daya diperoleh, baik dari *pressure drop* fase gas, atomisasi fase cair, atau alat mekanis. Hal ini sering disebut sebagai *Equivalent Energy Theory*.

Teori tersebut dijabarkan sebagai berikut:

$$P_T = P_G + P_L + P_{mech}$$

Dimana,

- $P_T$  = total daya kontak
- $P_G$  = daya karena *pressure drop* gas
- $P_L$  = daya karena atomisasi cairan *scrubber*
- $P_{mech}$  = daya karena alat mekanis untuk meningkatkan kontak contoh: rotor

Daya kontak ditentukan dari hilangnya gesekan di bagian *scrubber* yang dibasahi. Kehilangan tekanan akibat aliran gas diabaikan.

$P_G$  adalah daya kontak dari input energi aliran gas, yang umumnya dinyatakan sebagai hp/1000 acfm. Diperkirakan dari *pressure drop* yang diukur di *scrubber* sebagai:

$$P_G = 0,157 \Delta P$$

Dimana,

- $\Delta P$  = *pressure drop* di *venturi* dalam inci H<sub>2</sub>O

Diketahui:

- $\Delta P$  = 10,406 inci kolom air

Perhitungan:

- $P_G$  = 0,157 . 10,406  
= 1,634 hp/1000acfm

Daya kontak dari input energi arus cair,  $P_L$ , juga dinyatakan sebagai hp/1000 acfm. Hal ini didasarkan pada rasio cairan terhadap gas dan dinyatakan oleh:

$$P_L = 0,583 p_L (L/G)$$

Dimana,

- $P_L$  = tekanan pada inlet dalam psi
- $L/G$  = rasio cairan terhadap gas dalam gal/ft<sup>3</sup>

Diketahui:

$$\begin{aligned} L/G &= 200 \text{ gal/1000ft}^3 \\ p_L &= 2 \text{ psi} \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned} P_L &= 0,583 \cdot 2 \cdot 200 \\ &= 233,2 \text{ hp/1000acfm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_T &= 1,634 + 233,2 \\ &= 234,834 \text{ hp/1000acfm} \end{aligned}$$

Daya kontak berkorelasi dengan efisiensi pengumpulan scrubber,  $\eta$ . Korelasi ini sering dinyatakan sebagai jumlah "unit transfer", sebuah bilangan tak berdimensi yang didefinisikan oleh persamaan:

$$N_t = \ln\left(\frac{1}{1 - \eta}\right)$$

Jumlah unit transfer untuk daya kontak yang diberikan tergantung pada jenis *scrubber* dan karakteristik partikel. Untuk jenis *scrubber* dan partikulat tertentu, hubungan antara unit transfer dan daya kontak adalah:

$$N_t = \alpha P_T^\beta$$

Dimana,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien empiris yang merupakan karakteristik tipe *scrubber* dan partikulat yang dikumpulkan dapat dilihat di Tabel 2.5.

Diketahui:

$$\begin{aligned} P_T &= 234,834 \text{ hp/1000acfm} \\ \alpha &= 0,87 \\ \beta &= 0,459 \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned} N_t &= 0,87 \cdot (234,834)^{0,459} \\ &= 10,659 \end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas diketahui jumlah unit transfer 10,659 untuk daya kontak sebesar 234,834 hp/1000acfm.

### 5.7.3 Kecepatan *Scrubber* dan Area Penampang

Salah satu dari empat pendekatan yang dibahas sebelumnya dapat digunakan untuk memperkirakan *pressure drop* untuk menentukan kecepatan gas yang dibutuhkan di *throat venturi*. Kecepatan pada *throat* bergantung pada:

1. Campuran cair-gas dan rasio L/G
2. Turbulensi
3. Distribusi campuran cairan-gas dan PM di *throat*
4. *Hydrolic losses* di *throat*

Kecepatan di *throat* dibatasi oleh kecepatan gas yang dapat diterima pada baguian hilir *scrubber* seperti *mist eliminator*.

Terdapat persamaan teoritis yang tersedia untuk menghitung kecepatan *throat*, namun kebanyakan produsen menentukan kecepatan *throat* secara eksperimental. Kecepatan *throat* dan luas penampang dapat diestimasi dengan menggunakan persamaan Bernoulli yang dimodifikasi:

$$v_t = \frac{Q_m}{A_t} = C \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_{sat}}}$$

Dimana,

$v_t$	= kecepatan di <i>throat</i>
$Q_m$	= laju aliran udara volumetrik
$A_t$	= area penampang <i>throat</i>
$\rho_{sat}$	= densitas gas pada keadaan jenuh
$C$	= konstanta

Diketahui:

$$\begin{aligned} Q_m &= 5000 \text{ ft}^3/\text{s} \\ A_t &= 10 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{5000}{10} \\ &= 500 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Dari daerah penampang *throat*, dimensi *throat* dapat diperkirakan. Diameter *throat* dapat dihitung sebagai:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 A_t}{\pi}}$$

Diketahui:

$$A_t = 10 \text{ ft}^2$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned} d_t &= \sqrt{\frac{4 \cdot 10}{3,14}} \\ &= 3,569 \text{ ft} \end{aligned}$$

Panjang *throat* dan bagian divergen *venturi* dioptimalkan untuk pemulihan tekanan. Panjang *throat* umumnya 3 kali diameter *throat* (atau lebar) dan panjang bagian divergen 4 kali diameter *throat* (atau lebar).

$$\begin{aligned} l_t &= 3 d_t \\ l_{div} &= 4 d_t \end{aligned}$$

Diketahui:

$$d_t = 3,569 \text{ ft}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}l_t &= 3 \cdot 3,569 \\&= 10,707 \text{ ft} \\l_{div} &= 4 \cdot 3,569 \\&= 14,276 \text{ ft}\end{aligned}$$

Perhitungan dimensi *scrubber* kedua yang dipasang seri setelah *scrubber* pertama.

Diketahui:

$$\begin{aligned}Q_m &= 2500 \text{ ft}^3/\text{s} \\A_t &= 5 \text{ ft}^2\end{aligned}$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}V_t &= \frac{2500}{5} \\&= 500 \text{ ft/s}\end{aligned}$$

Dari daerah penampang *throat*, dimensi *throat* dapat diperkirakan. Diameter *throat* dapat dihitung sebagai:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 A_t}{\pi}}$$

Diketahui:

$$A_t = 5 \text{ ft}^2$$

Perhitungan:

$$\begin{aligned}d_t &= \sqrt{\frac{4 \cdot 5}{3,14}} \\&= 2,523 \text{ ft}\end{aligned}$$



Panjang *throat* dan bagian divergen *venturi* dioptimalkan untuk pemulihan tekanan. Panjang *throat* umumnya 3 kali diameter *throat* (atau lebar) dan panjang bagian divergen 4 kali diameter *throat* (atau lebar).

$$l_t = 3 d_t$$

$$l_{div} = 4 d_t$$

Diketahui:

$$d_t = 2,523 \text{ ft}$$

Perhitungan:

$$l_t = 3 \cdot 2,523$$

$$= 7,571 \text{ ft}$$

$$l_{div} = 4 \cdot 2,523$$

$$= 10,095 \text{ ft}$$

Sudut pada bagian konvergen sebesar 30° dan pada bagian divergen sebesar 12°.

## 5.8 Menghitung Penggunaan Sumber Daya Lainnya

### 5.8.1 Menghitung Penggunaan Air

Sebagian besar sistem *wet scrubber* melakukan sirkulasi ulang cairan *scrubber*. Untuk mengurangi kandungan zat padat dari cairan *scrubber*, sebagian cairan dikeluarkan dari sistem dan air bersih ditambahkan. *Venturi scrubber* biasanya memiliki konsentrasi padatan puncak 20 - 30%. beban arus gas PM yang lebih tinggi membutuhkan tingkat penambahan air yang lebih tinggi sehingga menghasilkan lebih banyak limbah cair dan biaya pembuangan yang lebih tinggi.

Aliran massa partikel ke dalam cairan scrubber adalah:

$$\dot{m}_{PM} = \eta L_{PM} Q_i$$

Dimana,

$$\dot{m}_{PM} = \text{laju alir massa PM}$$

$\eta$	= efisiensi pengumpulan <i>scrubber</i>
$L_{PM}$	= beban PM di inlet
$Q_i$	= laju aliran gas buang di inlet

Diketahui:

$\eta$	= 99%
$L_{PM}$	= 1,5221 kg/s
$Q_i$	= 13,257 m <sup>3</sup> /s

Perhitungan:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{PM} &= 99\% \cdot 1,5221 \cdot 13,257 \\ &= 19,976 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dengan menggunakan kerapatan air, 1,0 kg/L (8,3 lb/gal), dan konsentrasi padatan, laju pengeluaran untuk cairan *scrubber* dapat dihitung sebagai:

$$Q_{bleed} = \frac{\dot{m}_{PM}}{f_{solid} \rho_{water}}$$

Dimana,

$Q_{bleed}$	= tingkat pengeluaran air
$f_{solid}$	= fraksi massa padatan dalam air resirkulasi

Diketahui:

$f_{solid}$	= 5,4
$\dot{m}_{PM}$	= 19,976 kg/s

Perhitungan:

$$\begin{aligned}Q_{bleed} &= \frac{19,976}{5,4} \\ &= 3,699 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Laju alir total air yang dibutuhkan oleh sistem,  $Q_T$ , adalah jumlah air yang menguap dan air yang dikeluarkan.

$$Q_{T(water)} = Q_{wv(evap)} + Q_{bleed}$$

Diketahui:

$$Q_{wv(evap)} = 76,174 \text{ kg/s}$$

$$Q_{bleed} = 3,699 \text{ kg/s}$$

Perhitungan:

$$Q_{T(water)} = 76,176 + 3,699$$

$$= 79,874 \text{ kg/s}$$

$$= 79873,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 5.8.2 Menghitung Penggunaan Daya Listrik

Penggunaan daya listrik pada *wet scrubber* jenis *venturi* adalah untuk penggunaan fan dan pompa. Kebutuhan energi tersebut didapat dari tipikal setiap jenis *wet scrubber*. Kebutuhan tersebut dapat dilihat pada table 5.4.

**Tabel 5.9** Kebutuhan Energi pada Berbagai Macam Jenis *Scrubber*

<b>Tipe Scrubber</b>	<b>Aliran Cairan (gpm)</b>	<b>Tekanan (psig)</b>	<b>Daya Pompa (HP)</b>	<b><math>\Delta P</math> Gas (in. wg)</b>	<b>Daya Fan (HP)</b>	<b>Relative HP/100 0 cfm</b>
<i>Wet Cyclone</i>	10	60	0,91	8	2,5	3,41
<i>Venturi</i>	10	20	0,233	15	3,94	4,27
<i>Jet Venturi</i>	40	70	3,28	0	0	3,28

Pada desain ini daya pompa yang digunakan adalah sebesar 0,233 HP dan untuk daya fan sebesar 3,94 HP.

## 5.9 Menghitung Cost

### 5.9.1 Capital Cost

Berdasarkan literatur dari US EPA, 2008 dan Schnelle dan Brown , 2002., *capital cost* untuk *wet scrubber* tipe *venturi* dengan efisiensi sebesar 99% adalah USD 21/ft<sup>3</sup>.

Sehingga total cost yang dikeluarkan untuk *capital cost* adalah sebesar USD 157.000. Dengan rincian USD 105.000 untuk *scrubber* tahap I dan USD 52.500 untuk *scrubber* tahap II.

**Tabel 5.10** Cost Analysis Berbagai Macam Jenis Scrubber

No.	Type Scrubber	Material Removal	Capture Efficiency (%)			Cost		
			PM	VOC	Gas Anorganik	Capital Cost (\$/ft <sup>3</sup> )	O&M Cost (\$/ft <sup>3</sup> )	Total Cost (\$/ton)
1.	<i>Spray</i>	PM/Gas	70-90	50-95	95-99	\$2 - \$6	\$1,5 - \$30	\$45 - \$860
2.	<i>Packed Bed</i>	Gas		70-99	95-99	\$11 - \$55	\$15 - \$49	\$100 - \$500
3.	<i>Fiber Bed</i>	PM/Gas	70-90	70-99		\$1 - \$3	\$1,6 - \$36	\$3 - \$344
4.	<i>Impingement</i>	PM/Gas	50-99		90-99	\$4 - \$11	\$3,1 - \$44	\$94 - \$1300
5.	<i>Mechanical</i>	PM	80-99			\$2,6 - \$17	\$3 - \$79	\$60 - \$1400
6.	<i>Venturi</i>	PM	70-99			\$2,5 - \$21	\$4,4 - \$120	\$70 - \$2400

**Tabel 5.11** Biaya Pengeluaran Listrik *Venturi Scrubber*

	Daya (HP)	Daya (kW)	Daily Power (kWh)	Tarif Dasar Listrik (Rp)	Daily Cost (Rp)	Annual Cost (Rp)
Pompa	0,233	0,173818	4,171632	966,74	4032,884	1472002
Fan	3,94	2,93924	70,54176	966,74	68195,54	24891372
<b>Total</b>		3,113			72228	26363375

Dari tabel 5.11 daya yang dibutuhkan venturi adalah sebesar 3,113 kW, dengan biaya yang dikeluarkan setiap harinya adalah Rp 72.228,00. Biaya yang dikeluarkan untuk kebutuhan listrik tiap tahunnya adalah Rp 26.363.375,00.

Sedangkan untuk air, biaya yang dikeluarkan untuk memenuhi kebutuhan sebesar 79.874 m<sup>3</sup>, dengan tarif air baku industri di PDAM Kota Cilegon adalah 10.500/m<sup>3</sup>. Biaya yang dikeluarkan adalah sebesar Rp 838.674.589,00.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari perencanaan ini adalah:

1. Teknologi alternatif untuk mengolah emisi dari *blast furnace* PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk., Cilegon – Banten adalah *wet scrubber* jenis *venturi*.
2. Desain *wet scrubber* yang digunakan adalah *venturi* yang dipasang secara seri agar dapat memenuhi baku mutu yaitu, Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia nomor 13 tahun 1995. Dimensi *wet scrubber* yang direncanakan adalah:
  - *Venturi I* memiliki *throat* dengan diameter sebesar 3,659 ft, tinggi *throat* sebesar 10,707 ft dan tinggi bagian divergen sebesar 14,276 ft. Bagian konvergen memiliki sudut 30° sedangkan bagian divergen memiliki sudut sebesar 12°.
  - *Venturi II* memiliki *throat* dengan diameter sebesar 2,523 ft tinggi *throat* sebesar 7,571 ft dan tinggi bagian divergen sebesar 10,095 ft. Bagian konvergen memiliki sudut 30° sedangkan bagian divergen memiliki sudut sebesar 12°.
3. Efisiensi *wet scrubber* yang digunakan adalah sebesar 99% dengan material lolos untuk ukuran partikel di bawah 5 µm adalah sebesar 0,122. Dengan *pressure drop* sebesar 10,406 inci kolom air partikulat yang disingkirkan adalah sebesar 87,8%.

### 6.2 Saran

Saran yang diberikan berdasarkan perencanaan ini adalah:

1. Diperlukan penelitian lanjutan mengenai efisiensi setiap fraksi PM.
2. Diperlukan penelitian lanjutan mengenai *chemical test* emisi dari *blast furnace*.

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



## DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, K. S. 2013. Performance of Venturi Scrubber. International Journal of Engineering Research and Development Volume 7 Issues 11 pp.53 – 69
- Ali, M., Qi, Y. C., dan Mehboob, K. 2012. A Review of Performance of a Venturi Scrubber. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology Volume 4 No. 19 pp. 3811 – 3818
- Amelia, D. 2011. Dampak Lingkungan dan Pelaksanaan Corporate Social Responsibility (CSR) PT. Krakatau Steel Kota Cilegon. Depok: Universitas Indonesia
- Boubel, R. W., Fox D. L., Turner D. B., dan Stern A. C., 1994. Fundamentals of Air Pollution 3<sup>rd</sup> Edition. San Diego: Academic Press
- Chang, C. S. dan S. Behrooz Ghorishi. 2003. Simulation and Evaluation of Elemental Mercury Concentration Increase in Flue Gas Across a Wet Scrubber. **Environmental Science and Technology Volume 37 No. 24 2003.**
- Cheremisinoff, N. P. 2002. Handbook of Air Pollution Prevention and Control. New York: **Butterworth-Heinemann**
- Cooper, D and Alley, F. 1994. Air Pollution Control: a Design Approach 2<sup>nd</sup> Edition. Illinois: Waveland Press
- Danzomo, D. A., Salami, M. E., Jibrin, S., Khan, M. R., dan Nor, I. M. 2012. Performance Evaluation of Wet Scrubber System for Industrial Air Pollution Control. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Volume 7 No. 12 pp. 1669 – 1677
- de Nevers, N., 2000. Air Pollution Control Engineering 2<sup>nd</sup> Edition. Singapore: **McGraw-Hill**
- Government of Japan. 1998. Air Pollution Control Technology Manual. Environmental Agency Government of Japan. pp. 206 – 236
- Guerra, V. G., Bettega, R., Goncalves, J. A. S., dan Coury, J. R. 2012. Pressure Drop and Liquid Distribution in a Venturi Scrubber: Experimental Data and CFD Simulation. American Chemical Society pp. 8049 – 8060

- Hesketh, H. E. 1979. Handbook of Environmental Engineering Volume 1 Air and Noise Pollution Control. New Jersey: **The Humana Press**
- Jiuan, Y. L. 2005. Evaluation of Wet Scrubber System. University of Soutern Queensland
- Kim, H. T., C. H. Jung, S. N. Oh, dan K. W. Lee. 2001. Particle Removal Efficiency of Gravitational Wet Scrubber Considering Diffusion, Interception, and Impaction. **Environmental Engineering Science Volume 18 No. 2 2001.**
- Kousalya, D. S., Venkatesh, S., and Chandrasekaran. 2015. Performance Improvement of Venturi Wet Scrubber. Journal of Mechanical and Civil Engineering Volume 2 Issues 4 April 2015 Paper 10.
- Lajtoni, A. 2011. Blast Furnace Gas Cleaning System Design. Ijmuiden: Millenium Steel
- Maas, J. H. 1979. Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers. Singapore: McGraw-Hill
- Mahendran, M. 1996. The Modulus of Elasticity of Steel – Is It 200 GPa?. 13<sup>th</sup> International Speciality Conference on Cold-Formed Steel Structures. Missouri
- Mahiuddin, K., Strezov, V., Nelson, P. F., Selcer, E., and Evans, T. 2014. Mass and Elemental Distribution of Atmospheric Particles Nearby Blast Furnace and Electric Arc Furnace Operated Industrial Areas in Australia. **Science of the Total Environment 487.**
- Nugroho, A. S. S. 2010. Hubungan Konsetrasi Debu Total dengan Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja PT. KS. Depok: Universitas Indonesia
- Republik Indonesia. 1995. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995. Jakarta: Sekertariat Negara
- Republik Indonesia. 1996. Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Nomor 205 Tahun 1996. Jakarta: Sekertariat Negara
- Republik Indonesia. 1999. Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999. Jakarta: Sekertariat Negara
- Reufer, F dan Davidi, C. 2010. Modern Blast Furnace and Converter Gas Cleaning. Essen: Paul Wurth

- Rudnick, S. N., Koehler, J. L. M., Martin, K. P., Leith, D., dan Cooper, D. W. 1986. Particle Collection Efficiency in a Venturi Scrubber: Comparison of Experiments with Theory. *Environmental Science and Technology* Volume 20 No. 3 pp. 237 – 242
- Tela, B. M., Ngala, G. M., dan Abubakar, A. B. 2014. Separation of Gas Particle Using Venturi-Type Wet Scrubber in Ashaka Cement Factory PLC. **International Journal of Research in Mechanical Engineering** Volume 2, Issue 6, November – December, 2014.
- Theodore, Louise. 2008. Air Pollution Control Equipment Calculation. New Jersey: John Willey & Sons
- United State Environmental Protection Agency. 1978. Particulate Control Highlights: Performance and Design Model for Scrubber. North Carolina: US. EPA
- United State Environmental Protection Agency. 1998. Air Pollution Control Technology Fact Sheet. North Carolina: US. EPA
- United State Environmental Protection Agency. 2001. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP) for Integrated Iron and Steel Plants – Background Information for Proposed Standards. North Carolina: US. EPA
- United State Environmental Protection Agency. 2002. EPA Air Pollution Cost Manual 6<sup>th</sup> Edition. North Carolina: US. EPA
- United State Environmental Protection Agency. 2002. Particulate Matter Control. North Carolina: US. EPA
- United State Environmental Protection Agency. 2012. Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emission from the Iron and Steel Industry. North Carolina: US. EPA
- Widyawati, L. M. S., dan Tomo, H. S. Evaluation of Particulate Emission Control Units on Acid Regeneration Plant PT. Krakatau Steel, Indonesia. Bandung: Institut Teknologi Bandung
- Zulhan, Zulfiadi. Juli 2013. “Aspek Teknologi dan Ekonomi Pembangunan Pabrik Pengolahan Bijih Besi menjadi Produk Baja di Indonesia”. **Majalah Metalurgi** V, 28.2: 105-120.

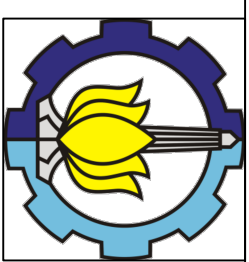
**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## BIOGRAFI PENULIS



Waode Nurul Roisyah Aminy Budiman biasa dipanggil Ami. Penulis lahir di Bekasi, 24 April 1994. Penulis mengenyam pendidikan dasar pada tahun 2000-2006 di SDIT Ummu'l Quro Depok. Kemudian dilanjutkan di SMPN 131 Jakarta pada tahun 2006-2009. Penulis melanjutkan pendidikan tingkat atas di SMAN 28 Jakarta pada tahun 2009-2012. Penulis melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya pada tahun 2012 dan terdaftar dengan NRP 03211240000066.

Selama perkuliahan, penulis aktif sebagai panitia di berbagai kegiatan HMTL. Selain itu, penulis juga pernah dipercaya sebagai Sekretaris Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Tennis Lapangan. Di luar ITS, penulis juga aktif di AIESEC Surabaya. Penulis juga mengikuti pelatihan dan seminar di bidang Teknik Lingkungan dalam rangka pengembangan diri. Penulis dapat dihubungi via e-mail di [aminybudiman@gmail.com](mailto:aminybudiman@gmail.com).



Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumiharian  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

Tugas Akhir

Perencanaan Emisi PM10 pada Industri  
Peleburan Baja Cilegon - Banten

Judul Gambar

Tampak Depan Venturi I

Legenda

Nama Mahasiswa

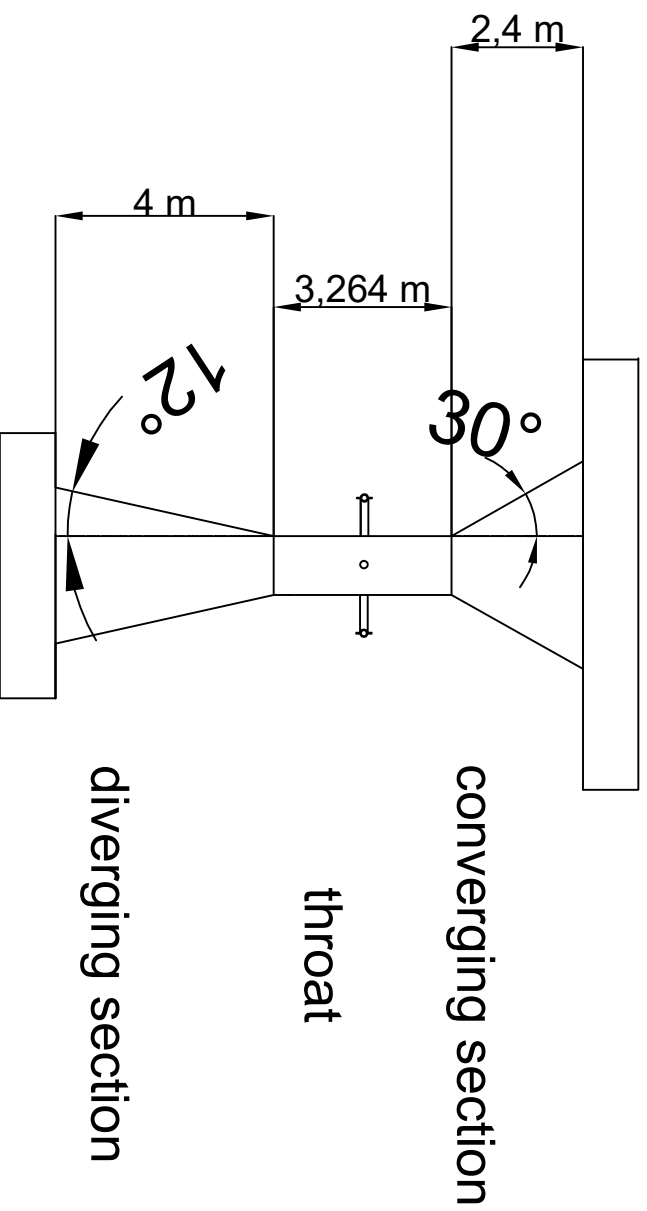
W. Nurul Roisyah Aminy Budi,man  
NRP : 03211240000066

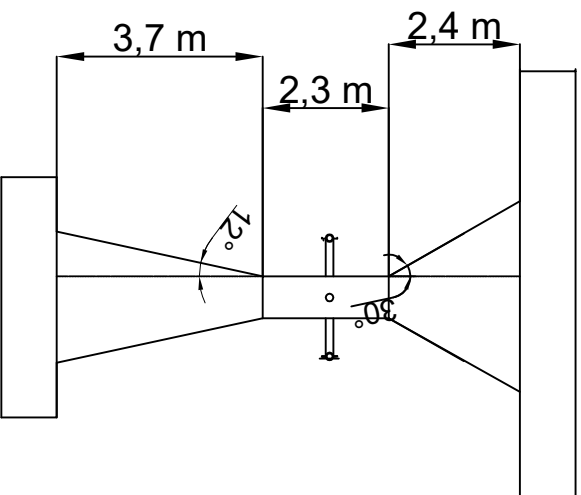
Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

Skala Nomor Gambar

1:1000 2





converging section

throat

diverging section



Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumiharian  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

Tugas Akhir

Perencanaan Emisi PM10 pada Industri  
Peleburan Baja Cilegon - Banten

Judul Gambar

Tampak Depan Venturi II

Legenda

Nama Mahasiswa

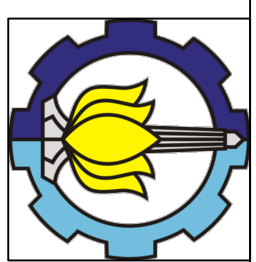
W. Nurul Roisyah Aminy Budiiman  
NRP : 03211240000066

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

Skala Nomor Gambar

1:1000 3



Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihuan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

Tugas Akhir

Perencanaan Emisi PM10 pada Industri  
Peleburan Baja Cilegon - Banten

Judul Gambar

Potongan Venturi I

Legenda

Nama Mahasiswa

W. Nurul Roisyah Aminy Budiiman  
NRP : 03211240000066

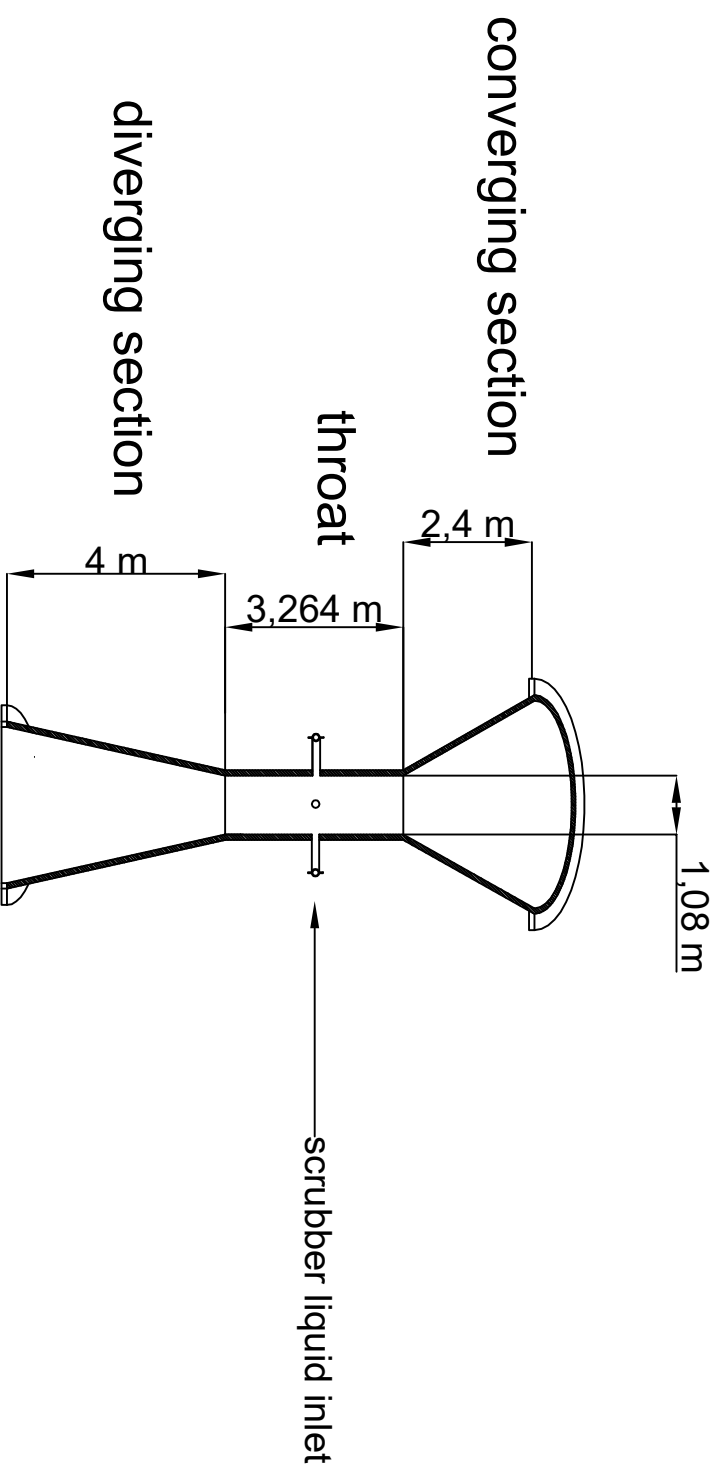
Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

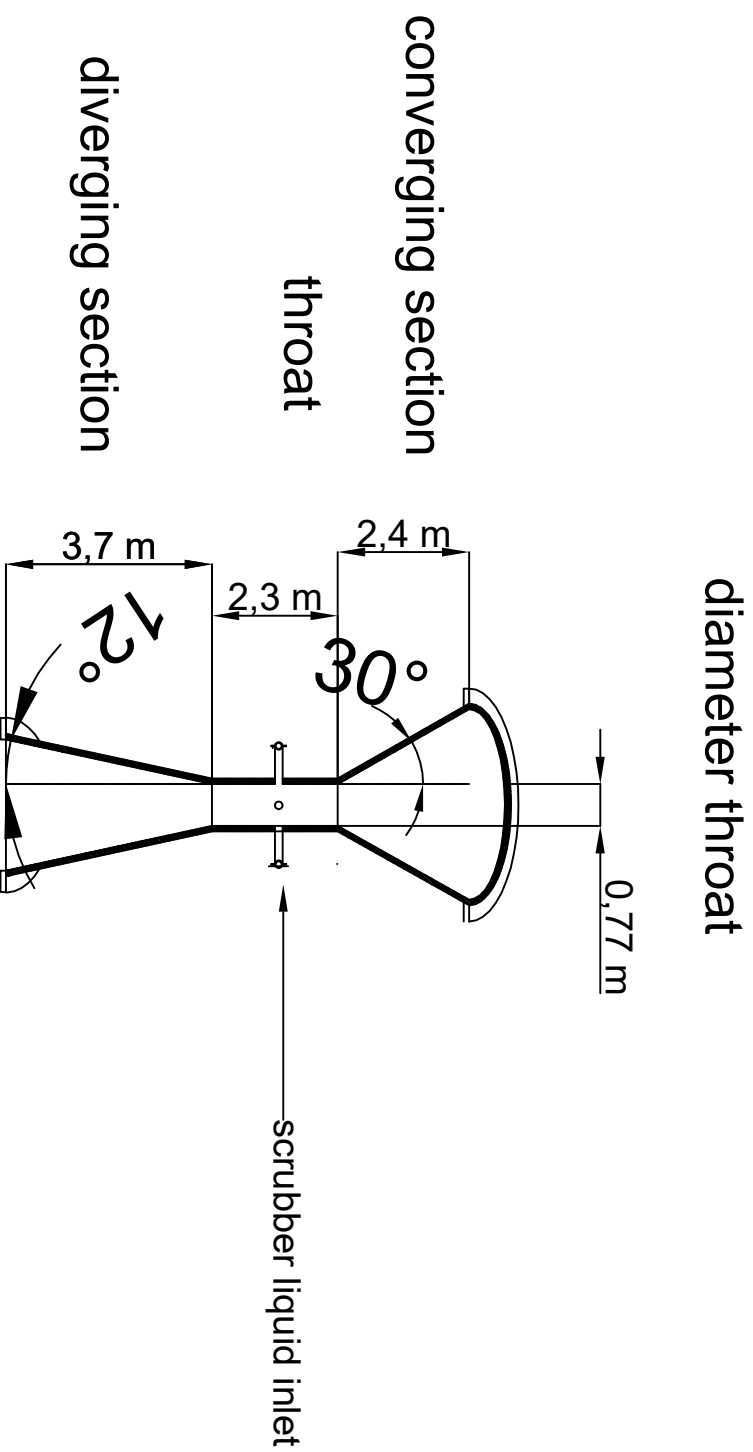
Skala Nomor Gambar

1:1000 4

diameter throat







Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumiharian  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

Tugas Akhir

Perencanaan isi PM10 pada Industri  
Peleburan Baja Cilegon - Banten

Judul Gambar

Tampak Potong Venturi 2

Legenda

Nama Mahasiswa

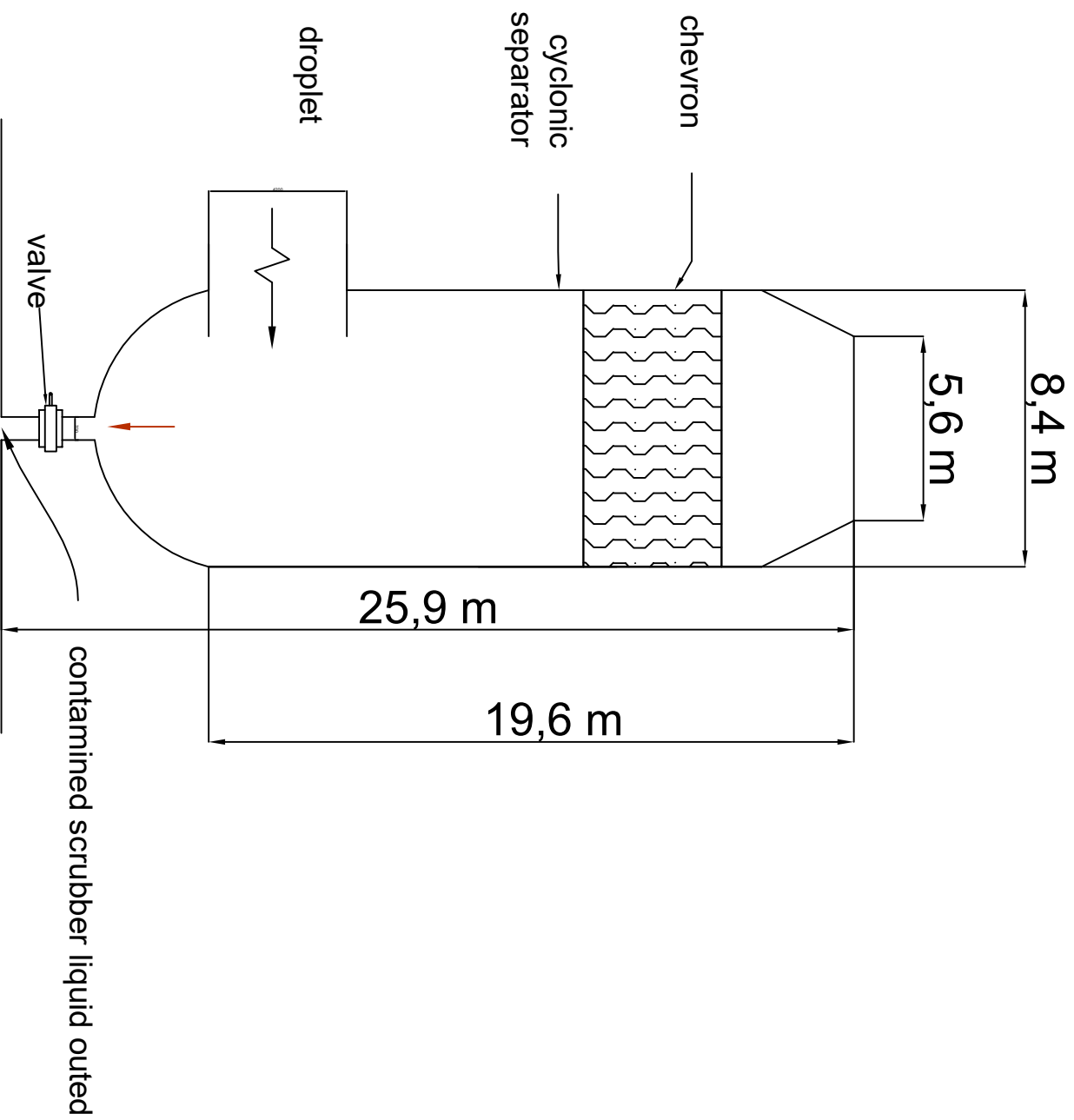
W. Nurul Roisyah Aminy Budiiman  
NRP : 03211240000066

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

Skala Nomor Gambar

1:1000 5



Departemen Teknik Lingkungan  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihuan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018

Tugas Akhir

Perencanaan Emisi PM10 pada Industri  
Peleburan Baja Cilegon - Banten

Judul Gambar

Tampak Depan Venturi II

Legenda

Nama Mahasiswa

W. Nurul Roisyah Aminy Budiiman  
NRP : 03211240000066

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

Skala

Nomor Gambar

1:1000

6



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN FTLK-ITS  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS  
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Ganjil 2017/2018

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03  
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji  
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 16 Juli 2018

Pukul : 08.00 - 10.00 WIB


Lokasi : TL-104

Judul : PENGELOLAAN EMISI PM10 PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON - BANTEN

Nama : W. NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN

NRP. : 03211240000066

Topik : Perencanaan

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1.	Abstrak diperbaiki
2.	Gambar diperbaiki
3.	Pressure Drop ?
	 23/7 2018

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

Alfan Purnomo

(  )

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

( )



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN FTLK-ITS  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS  
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Ganjil 2017/2018

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03  
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji  
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 16 Juli 2018

Pukul : 08.00 - 10.00 WIB

Lokasi : TL-104

Judul : PENGELOLAAN EMISI PM10 PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON - BANTEN

Nama : W. NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN

NRP. : 03211240000066

Topik : Perencanaan

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
(1)	Abstrak diperbaiki
(2)	Judul diperbaiki → Desain Perencanaan
(3)	Hal 61.
(4)	Hal 63.
(5)	Hal 66 → belum ada penjumlahan Gambar 4.1.
(6)	Kemipulannya ?
(7)	Hal 69
(8)	Hal 76
(9)	Gambar teknik diperbaiki.

23/7/2018

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

\_\_\_\_\_

(  )

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT

( \_\_\_\_\_ )





PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN FTLK-ITS  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS  
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Ganjil 2017/2018

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03  
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji  
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 16 Juli 2018

Pukul : 08.00 - 10.00 WIB

Lokasi : TL-104

Judul : PENGELOLAAN EMISI PM10 PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON - BANTEN

Nama : W. NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN

NRP. : 03211240000066

Topik : Perencanaan

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir
1	Apakah itu debu fugitif
2	Pengelola debu ?
3	Daftar insiden debu
4	Macam scrubber
5/72	Vol. debu jenis
6/76	4. di bagian & 1. mana ?
7.	OM Unit

27/7/18

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Seminar Kemajuan selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Penguji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing

Dosen Penguji

ARIE DS

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN FTLK-ITS  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS  
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR

Kode/SKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Ganjil 2017/2018

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02  
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing  
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 16 Juli 2018

Nilai TOEFL 513

Pukul : 08.00 - 10.00 WIB

Lokasi : TL-104

Judul : PENGELOLAAN EMISI PM10 PADA INDUSTRI PELEBURAN BAJA CILEGON - BANTEN

Nama : W. NURUL ROISYAH AMINY BUDIMAN

NRP. : 03211240000066

Topik : Perencanaan

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
	<p>- Tambahkan literatur.</p> <p>- Lihat masukan dari Dosen Penguji.</p>

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana  
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing  
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rachmat Boedisantoso, MT



ITS  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-05

**FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR**


Nama : W. Nurul Roisyah Aminy Badiman  
NRP : 0321124 0000066  
Judul Tugas Akhir : Perencanaan Emisi PM<sub>10</sub> pada Industri Peleburan Bata Cilegon - Banten

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1.	Tambahkan literatur	- literatur sudah ditambahkan tentang capital & OM cost
2	Perbaiki abstrak	
3.	Perbaiki gambar	- abstrak telah diperbaiki dengan menambahkan hasil
4.	Judul diperbaiki	- gambar telah didetailkan
5.	O&M Cost	- OM cost telah ditambahkan
6.	Daftar isi diperbaiki	- daftar isi telah diperbaiki

Dosen Pembimbing,

Mahasiswa Ybs.,

Dr. Ir. Fachmad Boedisantoso, MT

  
W. Nurul Roisyah Aminy B.